

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Studium polarizační módové disperze v simulačním programu
Optiwave**

**Study of Polarization Mode Dispersion in Simulation Program
OPTIWAVE**

2013

Jozef Jendrisek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jozef Jendrisek**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika
Téma: Studium polarizační módové disperze v simulačním programu Optiwave
Study of Polarization Mode Dispersion in Simulation Program
OPTIWAVE

Zásady pro vypracování:

1. Popis PMD
2. Sestavte v Optiwave model PON sítě a simulujte vliv PMD na přenos
3. Vyhodnoťte simulované data

Seznam doporučené odborné literatury:


SHARMA, R. L., Ranjit SINGH a Vinod KUMAR. Polarization Mode Dispersion (PMD), its limits, compensation and effect on optical fiber networks. Journal of computing. 2011, roč. 2011, č. 8. ISSN 2151-9617. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/64328412/Polarization-Mode-Dispersion-PMD-its-limits-compensation-and-effect-on-optical-fiber-networks>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pápeš**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 01.05.2013



.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval *Ing. Martinovi Pápešovi* za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Táto práca sa skladá vlastne z dvoch hlavných častí. Prvou z nich je popis PMD, kvôli čomu sa nachádza v optickom vlákne a aké javy ju popisujú. Taktiež kedy sa PMD prejavuje, ako sa prejavuje. Obsahom práce je tiež popis rôznych možností merania PMD a následne je kompenzácie. V druhej, praktickej časti práce je vytvorených niekoľko simulácií. Každá simulácia obsahuje aj graf, ktorý popisuje priebeh danej simulácie. Tieto simulácie popisujú výskyt PMD vo vlákne rôznej dĺžky a pri rôznych prenosových rýchlostiach. Ďalej je v práci popísaný aj vplyv PMD na prenos v PON sieti, ktorá je navrhnutá v simulačnom programe Optiwave. Vplyv PMD je vyjadrený pomocou stupňa polarizácie DOP a podľa Q-faktoru.

Kľúčové slová

analyzátor , DGD, disperzia, kompenzácia, metóda, optické vlákno, PMD, polarizácia, PON, simulácia, stupeň polarizácie, závislosť

Abstract

This work is actually composed of two main parts. The first is the description of PMD, because of what is in the optical fiber and what events it describes. Also, when the PMD manifests itself and how it manifests itself. The content of the work is also a description of the different options of measuring and different options of PMD compensation. In the second, practical part is formed several simulations. Each simulation includes a graph that describes the progress of the simulation. These simulations describe the occurrence of PMD in the fiber of different lengths and with different transmission speeds. Furthermore, the work described the impact of PMD on the transmission in PON network, which is designed in a simulation program OPTIWAVE. The impact of PMD is expressed by the degree of polarization DOP and by Q-factor.

Key words

analyser, DGD, dispersion, compensation, method, optical fiber, PMD, polarization, PON, simulation, degree of polarization, dependency

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
L	m	Dĺžka
n	°	Index lomu
T	s	Čas
τ	s	Časový rozdiel medzi dvoma vlastnými polarizačnými stavmi
N	-	počet odbočiek
PMD_Q	ps/km ^{1/2}	PMD koeficient
DGD_{MEAN}	ps	Stredná hodnota DGD

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
ADC	Analog-to-Digital Converter	Analógovo-Digitálny Prevodník
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	Integrovaný obvod so špecifickou aplikáciou
BER	Bit Error Rate	Bitová Chybovosť
CATV	Cable Television	Káblová Televízia
CD	Chromatic Dispersion	Chromatická Disperzia
CO-OFDM	Coherent Optical OFDM	Koherentné Optické OFDM
CSRZ	Carrier-Suppressed Return-to-Zero	Potlačenie Nosnej s Vracaním do Nuly
DCF	Dispersion Compensation Fiber	Disperziu Kompenzujúce Vlákno
DCM	Dispersion Compensation Modules	Disperziu Kompenzujúce Moduly
DFE	Decision Feedback Equalizer	Ekvalizér so spätným rozhodovaním
DGD	Differential Group Delay	Diferenciálne skupinové oneskorenie
DOP	Degree Of Polarization	Stupeň Polarizácie
DPSK	Differential Phase Shift Keying	Diferenciálne Fázové Kľúčovanie
DSP	Digital Signal Processing	Spracovanie Digitálneho Signálu
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Hustý Vlnový Multiplex
EDC	Electronic Dispersion Compensator	Elektronický Kompenzátor Disperzie
EDE	Electronic Distortion Equalizer	Elektronický Ekvalizér Skreslenia

EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Erbium Dopovaný Vláknový Zosilňovač
FEC	Forward Error Correction	Dopredná Korekcia Chýb
FFE	Feed-Forward Equalizer	Dopredný Ekvalizér
FSE	Fractional Spaced Equalizer	Frakčne Rozložený Ekvalizér
GINTY	General Interferometry	Všeobecná Interferometria
ISI	Inter-Symbol Interference	Medzisymbolová Interferencia
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation	Odhad Maximálnej Vierohodnosti Sekvencie
NRZ	Non-Return-to-Zero	Modulácia bez Vracania do Nuly
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ortogonalný Multiplex s Frekvenčným Delením
OFS	Optical Fiber Solutions	Názov firmy
OLT	Optical Line Termination	Zakončenie Optického Spojenia
ONU	Optical Network Unit	Jednotka Optickej Siete
OP	Outage Probability	Pravdepodobnosť Výpadku
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Pomer Optického Signálu k Šumu
PBS	Polarization Beam Splitter	Polarizačný Lúčový Delič
PC	Polarization Controller	Regulátor Polarizácie
PDM	Polarization Division Multiplex	Multiplex s Polarizačným Delením
PM	Polarization Mode	Polarizačný Mód
PMD	Polarization Mode Dispersion	Polarizačná Módová Disperzia
PMDC	PMD Compensator	PMD kompenzátor
PON	Passive Optical Network	Pasívna Optická Sieť
PS	Polarization Scrambler	Polarizačný Skrambler

PSP	Principal State of Polarization	Hlavný Stav Polarizácie
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadratúrne Fázové Kľúčovanie
RF	Radio Frequency	Rádiové Žiarenie
RZ	Return-to-Zero	Modulácia s Vracaním do Nuly
RZ-OOK	Return to Zero-On-Off Keying	On-Off Kľúčovanie s Vracaním do Nuly
SCR	Scrambler	Skrambler
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Štandard pre Digitálnu Komunikáciu
SONET	Synchronous Optical Networking	Štandard pre Digitálnu Komunikáciu
SOP	State Of Polarization	Stav polarizácie
TINTY	Traditional Interferometry	Tradičná Interferometria
TS	Training Symbol	Cvičný Symbol
VE	Viterbi Equalizer	Viterbiho Ekvalizér
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplex s vlnovým delením

Obsah

1	Úvod	1
2	Disperzie v optických vláknach	2
2.1	Chromatická disperzia.....	2
2.2	Módová disperzia	3
2.3	Polarizačná módová disperzia	4
3	Polarizačná Módová Disperzia - PMD	5
3.1	Dvojlom.....	5
3.2	Diferenciálne skupinové oneskorenie - DGD	5
3.3	Zníženie PMD pri výrobe vlákien.....	6
3.4	Tolerancia PMD v systémoch	6
3.5	Metódy merania PMD.....	7
3.5.1	Metóda pevného analyzátora	7
3.5.2	Jonesová maticová metóda	8
3.5.3	Interferometrická metóda	9
3.6	PMD limity a kompenzácie	10
3.6.1	Optické PMD kompenzátory.....	11
3.6.2	Elektronické Ekvalizéry Skreslenia	12
3.6.3	Kompenzácia PMD rýchlo-polarizačným skramblovaním	14
3.6.4	DSP umožňujúce PMDC techniky	15
3.6.5	Porovnanie kompenzačných technológií.....	17
4	Simulácia vplyvu PMD na prenos v PON sieti pomocou programu Optiwave	18
4.1	Závislosť PMD na dĺžke vlákna.....	18
4.2	Simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom DOP	21
4.3	Simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom Q-faktora	26
5	Záver	28
	Použitá literatúra	29

1 Úvod

V dnešnej dobe, keď v podstate všetka činnosť závisí na používaní internetu, je dôležité aby prístup k nemu bol čo najrýchlejší a bez obmedzení, či rušivých vplyvov. Preto sa telekomunikačná technika zaoberá novými technológiami, ktoré by tieto čím ďalej náročnejšie požiadavky splňovali. V súčasnosti je dopyt po prístupe na internet tak veľký, že treba enormne rozširovať, vytvárať alebo inovovať stávajúce siete a sieťové prvky. Tu sa vyskytla otázka, aké typy vedení použiť či už na spojovacie siete, alebo na prístupové siete. V minulosti boli, a zatiaľ ešte stále sú, najrozšírenejšie metalické vedenia. Je to z toho dôvodu, že na prenos dát ku koncovému užívateľovi sa používajú stávajúce telefónne vedenia. Avšak v súčasnosti, keď je treba spoľahlivo prenášať veľké objemy dát, sa dostávajú do popredia optické médiá. Šírka pásma optického vlákna je rádovo THz, čo mnohonásobne prevyšuje možnosti metalického vedenia (šírka pásma koaxiálneho kábla je 500 MHz). Ďalšími výhodami sú nízka hmotnosť a malé rozmery, čo umožňuje miniaturizáciu a zmenšenie priestoru v rozvážačoch. Veľkými výhodami sú tiež imunita voči interferencii a presluchom, nízke straty pri prenose svetelnej energie a keďže sú optické vlákna vyrábané zo skla alebo plastu, tak sú aj elektricky izolované, teda sú elektromagneticky odolné. Z ekonomického hľadiska sú tiež výhodné vďaka relatívne nízkym nákladom na výrobu, pretože základnými surovinami sú sklo, plast, ktoré nie sú strategickými surovinami. Cena výroby teda závisí hlavne na požadovanej čistote skla. Avšak najväčšou výhodou je, že optické vlákna dosahujú veľmi veľkých prenosových rýchlostí. Pre ich šírku pásma a prenosovú rýchlosť sa využívajú hlavne v spojovacích sieťach. Pre prístupovú sieť sa používajú hlavne metalické vedenia.

Napriek veľkému množstvu výhod majú optické vlákna aj nevýhody, ktoré negatívne vplyvajú na rýchlosť a kvalitu prenosu. Merný útlm vlákna, ktorý sa prejavuje rovnako ako pri metalických vedeniach je spôsobený niekoľkými faktormi. Sú to vlastná absorpcia, nevlastná absorpcia, lineárny a nelineárny rozptyl, straty mikroohybmi a makroohybmi. Ďalšími nevýhodami sú disperzie. Disperzia negatívne vplyva na prenos tým že rozširuje impulzy vo vlákne, a prijímač nemusí byť schopný správne rozlíšiť prijatý impulz. Existujú rôzne druhy disperzií, z ktorých najdôležitejšia je Polarizačná Módová Disperzia, pretože má náhodný priebeh, nedá sa teda úplne eliminovať, len potlačiť.

2 Disperzie v optických vláknach

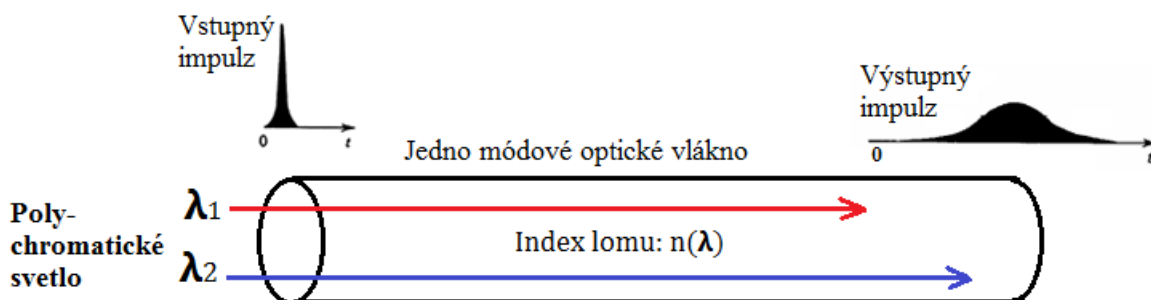
Poskytovatelia telekomunikačných služieb musia čeliť neustále rastúcim nárokom na šírku pásma vo všetkých oblastiach siete, od veľkých vzdialeností po prístup k sieťam. Vzhľadom k tomu, že inštalácia nových komunikačných väzieb by vyžadovala obrovské investície, telekomunikační poskytovatelia služieb preferujú zvyšovanie kapacity už existujúcich spojení použitím DWDM systémov alebo systémov s vyššími prenosovými rýchlosťami. Avšak, väčšina z inštalovaných optických vlákien je starých a vykazujú fyzické vlastnosti, ktoré by mohli obmedziť ich schopnosť prenášať vysokorýchlostné signály.

Rozšírenie svetelných pulzov, nazývané disperzia, je kritickým faktorom limitujúcim kvalitu prenosu signálu cez optické spojenie. Disperzia je dôsledkom fyzikálnych vlastností prenosového média. Jedno módové vlákna, používané vo vysokorýchlostných sieťach, sú predmetom Chromatickej Disperzie (CD), ktorá spôsobuje rozšírenie pulzu v závislosti na vlnovej dĺžke, a Polarizačnej Módovej Disperzie (PMD), ktorá spôsobuje rozšírenie pulzu v závislosti na polarizácii. Nadmerné rozšírenie spôsobí, že bit "pretečie" svoj určený časový úsek a prekryje susedné bity. Prijímač môže mať potom problémy rozpoznať susedné bity, čo zvyšuje Bit Error Rate. Ak chceme zachovať kvalitu prenosu, musíme zaistiť aby čas disperzie tvoril minimálnu časť z času prenosu, typicky je to 10% času.

S optickými sieťami pohybujúcimi sa od 2,5 Gbit/s cez 10 Gbit/s až po 40 Gbit/s, sa prijateľná hranica disperzie drasticky znižuje. Napríklad, množstvo prijateľnej chromatickej disperzie sa znižuje o faktor 16 pri prechode z 2,5 na 10 Gbit/s, a o faktor 16 pri prechode z 10 na 40 Gbit/s. Tieto prísne tolerancie vysokorýchlostných sietí znamenajú, že každý možný zdroj rozšírenia pulzu, by mal byť riešený. Prevádzkové spoločnosti potrebujú merať rozptyl svojich sietí pre posúdenie možnosti zvýšenia prenosovej rýchlosti, alebo na vyhodnotenie potreby kompenzácie.

2.1 Chromatická disperzia

Svetlo v prostredí sa pohybuje pomalšie ako vo vákuu. Rýchlosť akou sa svetlo pohybuje je určená indexom lomu prenosového média. V ideálnom prípade by index lomu nezávisel na vlnovej dĺžke svetla. Pretože toto nie je ten prípad, rôzne vlnové dĺžky v optickom vlákne sa prenášajú rôznymi rýchlosťami.

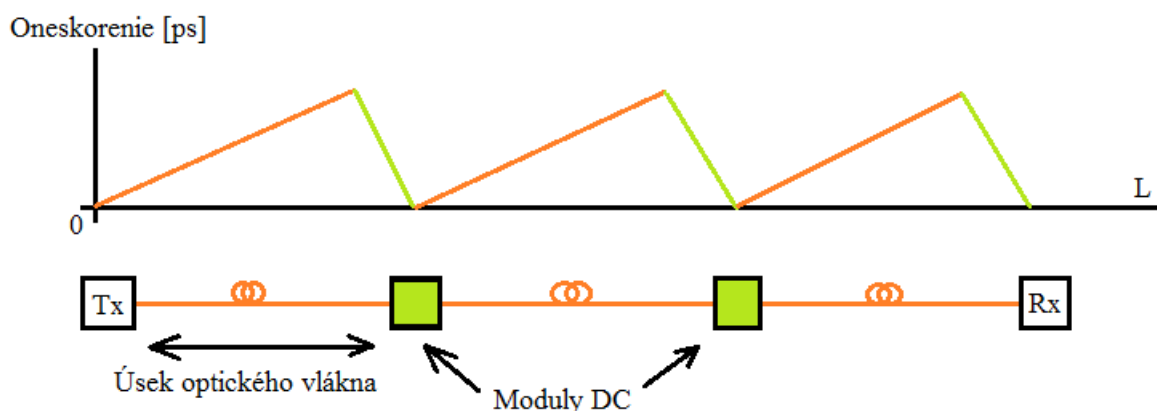


Obrázok 2.1: CD v jedno módovom optickom vlákne

Laserové zdroje sú spektrálne úzke, ale nie monochromatické. To znamená, že vstupný pulz obsahuje niekoľko komponentov vlnovej dĺžky, prenášaných v rôznych rýchlostiach, čo pulz rozširuje. Škodlivé účinky chromatickej disperzie vyúsťujú do zmiešania pomalších vlnových dĺžok jedného pulzu s rýchlejšími vlnovými dĺžkami príslušného pulzu, čo spôsobuje medzisymbolové interferencie.

Chromatická disperzia vlákna je vyjadrená $\frac{ps}{nm \cdot km}$, predstavujúca rozdielne meškanie alebo čas šírenia (v ps), pre zdroj so spektrálnou šírkou 1 nm na 1 km vlákna. Záleží na type optického vlákna, prenosovej rýchlosti alebo prenosovej vzdialenosti, či bude dobrá kvalita služieb.

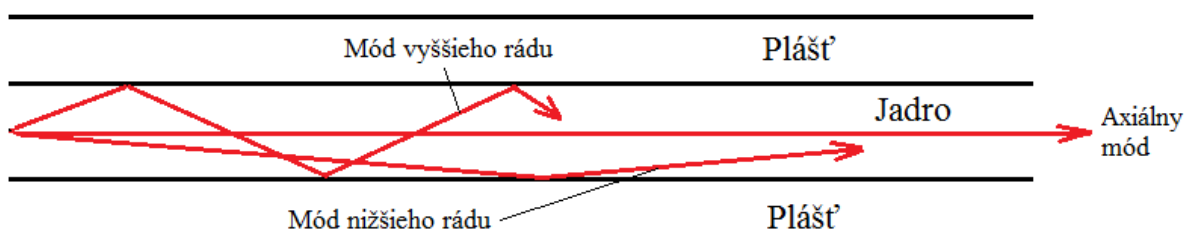
Našťastie, CD je pomerne stabilná, predvídateľná a kontrolovateľná. Disperziu Kompenzujúce Vlákn (DCF), s jeho veľkým záporným koeficientom CD, môže byť vložené do spojenia v pravidelných intervaloch, aby sa minimalizovala celková chromatická disperzia.[1]



Obrázok 2.2: Schéma kompenzácie chromatickej disperzie

2.2 Módová disperzia

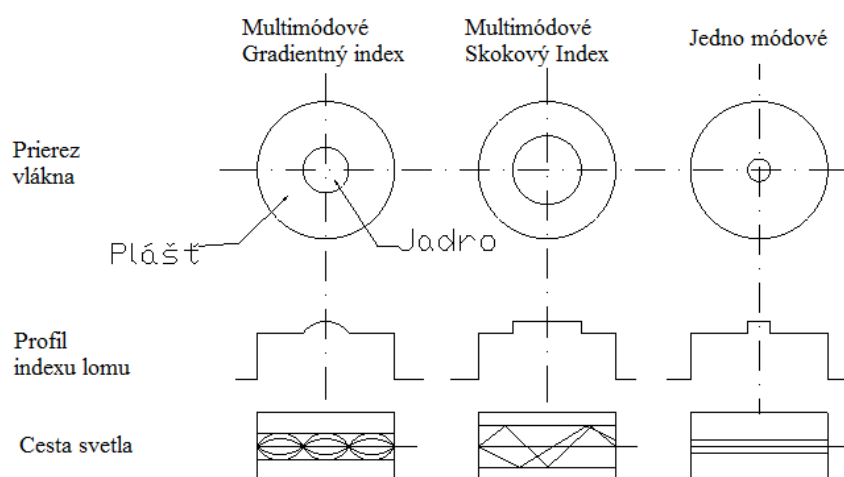
Módová disperzia sa zaoberá cestou (módom) každého svetelného lúča. Väčšina vysielateľov vysielá mnoho rôznych módov. Niektoré z týchto lúčov sa šíria priamo stredom optického vlákna, zatiaľ čo iné sa opakovane odrážajú od tienenia/jadra vlákna pozdĺž celého vlnovodu, tak ako je znázornené nižšie.



Obrázok 2.3: Šírenie svetelného lúča pozdĺž vlákna

Módy, ktoré do vlákna vstupujú v ostrých uhloch sa nazývajú módy vyššieho rádu. Tieto módy sa šíria vláknom oveľa dlhšie ako módy nižšieho rádu. Je tomu tak, pretože módy vstupujúce do vlákna v ostrých uhloch, sa musia odrázať od steny plášťa viac krát ako módy nižšieho rádu. Index lomu plášťa musí byť menší ako index lomu jadra, aby bol možný odraz od steny plášťa. Preto tieto

módy vyššieho rádu prispievajú k módovej disperzii. Jedna cesta ako znížiť módovú disperziu, je použiť vlákno s gradientným indexom lomu. Narozdiel od dvoch rozdielnych materiálov vo vláknach so skokovou zmenou indexu lomu, je vo vláknach s gradientným indexom lomu jadro dopované, takže index lomu postupne klesá cez mnoho vrstiev smerom od osi k plášťu. To znamená, že módy šíriace sa osou vlákna a módy nižšieho rádu sa budú šíriť pomalšie ako pri vlákne so skokovým indexom. Z toho vyplýva, že čas šírenia módov nižšieho a vyššieho rádu sa bude vyrovnávať, módová disperzia bude teda nižšia. Zodpovedajúce prierezy jednotlivých typov vlákien sú uvedené nižšie.



Obrázok 2.4: Prierezy vlákien

Módová disperzia môže byť úplne vylúčená pomocou jedno módového vlákna. Ako jeho názov napovedá, jedno módové vlákno prenáša iba jeden mód vlákna, takže nenastáva žiadne rozširovanie signálu kvôli módovej disperzii. Monochromatický laser spolu s jedno módovým vláknom kompletne eliminuje disperziu v optickom vlnovode, ale je zvyčajne používaný len na dlhom vedení kvôli jeho zložitosti a cene.[2]

2.3 Polarizačná módová disperzia

Polarizačná módová disperzia je neoddeliteľnou vlastnosťou všetkých optických médií. Je spôsobená rozdielom v rýchlosti šírenia svetla ortogonálnych polarizačných stavov prenosového média. Výsledkom je, že ak optický pulz obsahuje obe polarizačné zložky, potom rôzne polarizačné zložky budú cestovať rôznymi rýchlosťami a dorazia v rôznych časoch a to rozmazáva optický signál. PMD je bližšie popísaná v nasledujúcej kapitole. [3]

3 Polarizačná Módová Disperzia - PMD

Polarizačná Módová disperzia (PMD) je vážny problém, ktorý môže obmedziť vzdialenosť a prenosovú rýchlosť v systémoch s jedno módovými optickými vláknami. PMD je časovo premenný jav, ktorý znižuje šírku pásma systému a náklady na jej zmiernenie sú veľmi veľké. Ovpľyňuje spoľahlivosť siete a pri zvyšovaní rýchlostí sa stáva stále väčším problémom. Vplyv PMD bol prvýkrát zaznamenaný vo vysielaní CATV vzhľadom na citlivý charakter analógového signálu. Ale ako sa rýchlosť v sieťach stále zvyšuje, efekt PMD je stále viditeľnejší na miestach kde ovpľyňuje niektoré prenosy na krátku vzdialenosť. A ako sa prenosové rýchlosti zvyšujú, vplyv na spoľahlivosť, dosah, a šírku pásma jedno módových optických systémov bude čoraz väčší. Vec ďalej komplikuje to, že PMD jav je náhodný, štatistický založený a často nesprávne meraný. [4]

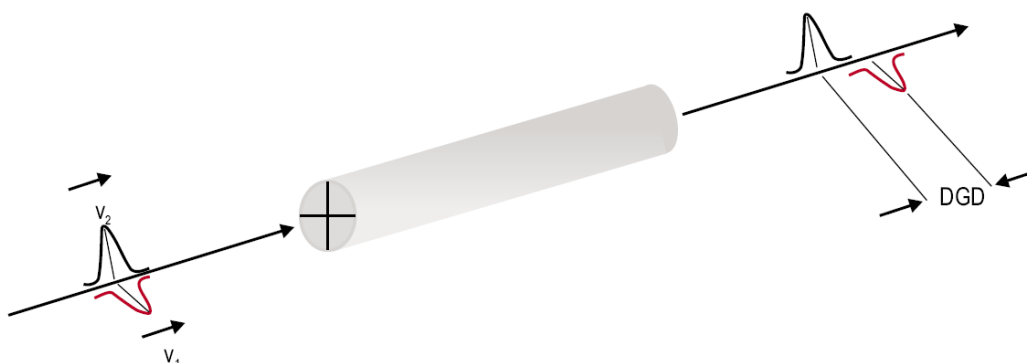
3.1 Dvojlom

Ako svetlo prechádza jedno módovým optickým vláknom smerom k prijímaču, "jeden mód" sa vlastne skladá z dvoch módov súvisiacich podľa princípov polarizácie vo vlákne. V dokonalom vlákne tieto dva módy cestujú rovnakou rýchlosťou, ale v reálnom vlákne, asymetria a nedostatky môžu spôsobiť, že módy budú mať rozdielnú rýchlosť šírenia. Tento efekt je známy ako dvojlom a je úmerný rozdielu dvoch indexov lomu. Vzhľadom k tomu, že sa polarizácia šíri pozdĺž celého vlákna, môže sa pulz rozšíriť natolko, že sa bude prekrývať s inými pulzmi alebo zmení svoj tvar, kým ho nezachytí prijímač.

Ako je uvedené vyššie jedno módové vlákna v skutočnosti podporujú dva módy súčasne, ktoré sú ortogonálne polarizované. V ideálnom vlákne s kruhovým jadrom, sa tieto dva módy šíria rovnakou fázovou rýchlosťou, avšak, reálne vlákna nie sú dokonalé symetrické. V dôsledku toho sa tieto dva módy šíria jemne odlišnou skupinovú a fázovou rýchlosťou. Navyše, environmentálne faktory, ako je ohyb, krútenie a anizotropné vplyvy, taktiež produkujú vo vlákne dvojlom, smer a veľkosť, ktorá sa mení s časom v dôsledku zmien okolitých podmienok, ako je teplota. Tieto faktory taktiež prenášajú energiu z jedného vlákna do druhého, čo v praxi spôsobuje problémy. [4][7]

3.2 Diferenciálne skupinové oneskorenie - DGD

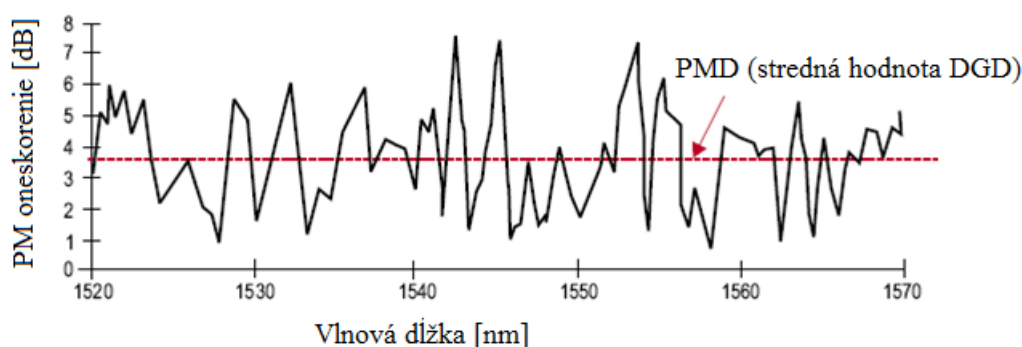
Diferenciálne skupinové oneskorenie charakterizuje PMD jav. DGD je rozdiel v dobe šírenia medzi dvoma vlastnými polarizačnými stavmi, čo sú stavy s minimálnym a maximálnym časom šírenia pre každú vlnovú dĺžku.



Obrázok 3.1: Diferenciálne skupinové oneskorenie v optickom vlákne

V prípade slabých módových spojení (Vlákno pre údržbu polarizácie - Krátka dĺžka bežného vlákna), svetlo polarizované pozdĺž pomalej osi prichádza neskôr ako svetlo polarizované pozdĺž rýchlej osi (i.e., rýchla a pomalá os majú rozdielne indexy lomu). V tomto prípade, PMD je rovná DGD. V ostatných prípadoch (dlhé optické vlákna), sa optické vlákno chová ako mnoho malých dvojlomových elementov spojených dohromady a zladenie rýchlej a pomalej osi je náhodné od prvku k prvku. V dôsledku toho, to vedie k náhodnému (silnému) módovému spojeniu.

V takých prípadoch sa DGD mení v závislosti na vlnovej dĺžke a PMD, vyjadrená v ps, je priemerná hodnota spektrálneho rozkladu DGD. Priemerná hodnota DGD je teda vyjadrená ako druhá odmocnina z dĺžky vlákna. Takže koeficient PMD je často počítaný ako: $\frac{ps}{\sqrt{km}}$. Okrem toho druhý rád koeficientu PMD, $\frac{ps}{nm \cdot km}$, vyjadruje závislosť PMD na vlnovú dĺžku.[6]



Obrázok 3.2: DGD v závislosti na vlnovej dĺžke

3.3 Zníženie PMD pri výrobe vlákien

V mnohých prípadoch je príčinou PMD výrobný proces. Tradične pri jedno-módových vláknach s dokonale symetrickými jadrami vypracovanými so žiadnymi nerovnosťami je očakávané veľmi malé PMD. Avšak, dokonca aj s týmito predpokladmi sú vlákna náchylné na vplyvy vonkajšieho prostredia, a účinok si všimneme len pri zvyšovaní prenosovej rýchlosti. Toto viedlo k vývoju vstavaných metód na kontrolu dvojlomu a tým aj PMD.

Patentovaná OFS technológia vytvára "rotáciu" v rámci vlákna počas procesu ťahania vlákna. Táto vstavaná rotácia znižuje dvojlom miešaním svetla medzi dve polarizácie, ktoré umožňujú vláknu vytvárať ultra nízku PMD. V tomto procese, oscilujúci kotúč prepožičiava rotáciu vláknu na začiatku ťahacej veže. Rotácia sa potom šíri smerom nahor, kde je sklovina rotovaná najprv na jednu stranu a potom na druhú. Ako sklo chladne, rotácia je "uzamknutá" do vlákna. Uhol rotácie a rýchlosť kmitania možno meniť tak, aby malo vlákno rôzne úžitkové vlastnosti.

Riadenie procesu počas výroby môže tiež pomôcť znížiť riziko vysokej PMD. Starostlivé výrobné techniky sú nutné pre minimalizovanie asymetrií jadra a plášťa vlákna.[4]

3.4 Tolerancia PMD v systémoch

Variácie DGD ($\Delta\tau$) a PSP v čase vedú k variáciám skreslenia signálu a tým ku kolísaniu BER. Okamžiky zlého BER, napríklad $BER > 10^{-3}$, pre systémy s podporou FEC, znamenajú výpadok pre prenosový systém. Vzhľadom k štatistickej povahe PMD, vplyv na prenosový systém je určený pravdepodobnosťou výpadku (OP) na PMD-indukovaný výpadok.

Robustnosť prenosového systému k PMD je vyjadrená PMD toleranciou, tj. maximálna PMD hodnota spojenia, ktorá je daná pravdepodobnosťou výpadku vzhľadom k určitému rozpätiu optického pomeru signálu k šumu (OSNR). Typické hodnoty pre OP a pre rozpätie sú 105 dB a 2 dB.

V niektorých prípadoch, odhad OP môže byť získaný na základe iba dvoch parametrov, DGD ($\Delta\tau$) určujúce PMD optického vlákna a maximálnou hodnotou DGD ($\Delta\tau_{\max}$) určujúcou toleranciu systému k narušeniu systému polarizačnou módovou disperziou. $\Delta\tau_{\max}$ je tiež označovaná ako tolerancia systému na DGD a označuje DGD, ktoré vedie k prahovej hodnote BER (napr. 10^{-3}).[5]

3.5 Metódy merania PMD

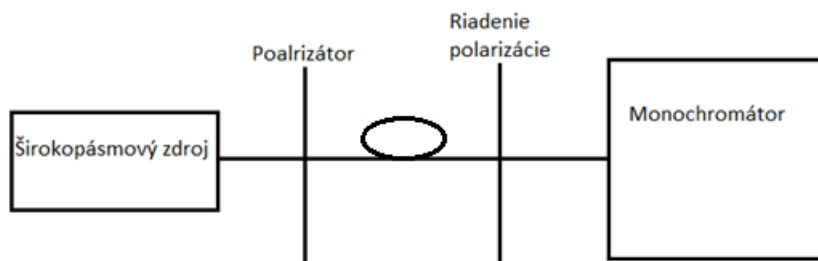
Hlavné metódy určenie PMD v optickom vlákne, popísané troma TIA/EIA priemyselnými normami: Metóda pevného analyzátoru (norma FOTP-113)

Jonesová maticová metóda (norma FOTP-122)

Interferometrická metóda (norma FOTP-124)

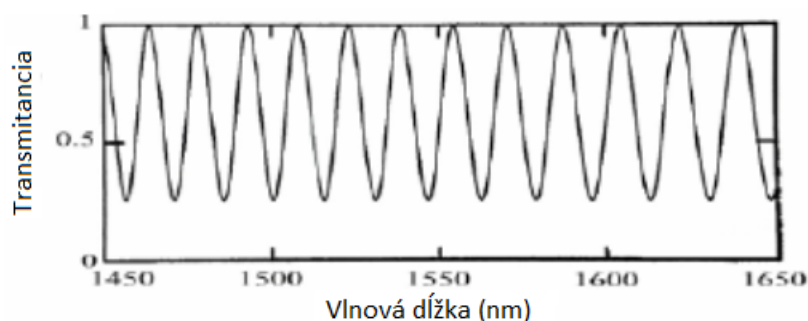
3.5.1 Metóda pevného analyzátoru

Táto metóda zahŕňa vyslanie monochromatického polarizovaného svetla do testovaného optického vlákna, zatiaľ čo na inom polarizátore prebieha meranie spektrálneho prenosu. Táto metóda je tiež označovaná ako metóda skenovania vlnových dĺžok.



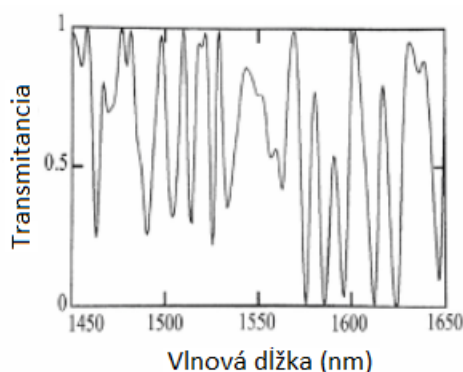
Obrázok 3.3: Schéma zapojenia pevného analyzátoru

Lineárny dvojitom vyvoláva pri skenovaní vlnovej dĺžky prenosovú odozvu v tvare sínusoidy.



Obrázok 3.4: Skenovanie vlnovej dĺžky krátkeho vlákna

Výpočet PMD na krátke vlákno je priamočiary: je to opak hranového rozstupu (pri frekvencii) v metóde skenovania vlnovej dĺžky. Ale v praxi sú dĺžky optických vlákien väčšie ako dĺžka spojenia. 50 kilometrové optické vlákno má všeobecne 0,1ps/km a dĺžka spojenia je rádovo jeden km.

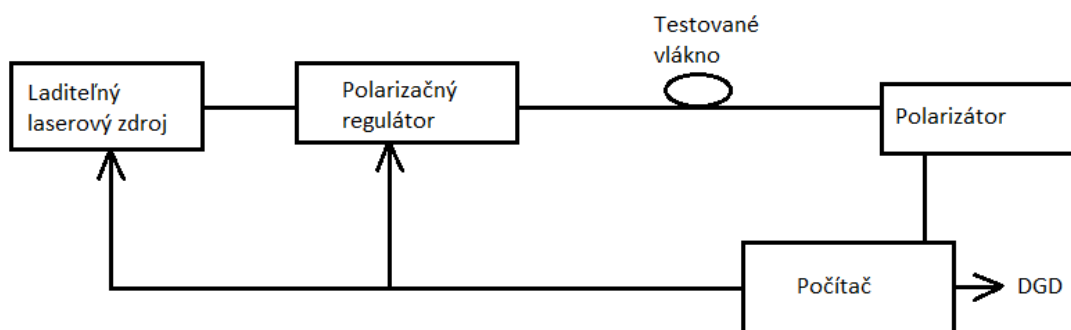


Obrázok 3.5: Skenovanie vlnovej dĺžky dlhého vlákna

Hlavným znakom v porovnaní s krátkym vláknom je, že spektrálny prenos nie je v prírode vôbec sínusový. Okolo niektorých vlnových dĺžok (1530 nm v tomto prípade) je hranový rozstup užší, čo poukazuje na to, že účinok PMD je v týchto oblastiach vyšší. V tomto prípade, PMD nemôže byť definovaná tak priamo ako tomu bolo pri krátkych vláknach. Jedna metóda používa počítanie hrán v rozsahu vlnovej dĺžky. Hodnota PMD môže byť vypočítaná aj keď nie je vždy jasné čo môžeme považovať za hranu. Napríklad môžeme použiť inú metódu a použiť Fourierovú transformáciu prenosového spektra a tá je technicky veľmi podobná interferometrii. Metóda pevného analyzátoru je obmedzená na rozsah oneskorenia 60 ps a je veľmi citlivá na pohyb vlákna, čo spôsobuje neistotu. Pre lepšiu presnosť je nutné priemerovanie, ale to zasa zvyšuje čas potrebný na meranie. Taktiež je u tejto metódy vyžadované skenovanie vlnovej dĺžky krok po kroku, čo znamená, že treba zabezpečiť aby bol krok vlnovej dĺžky dostatočne malý pre meranie PMD.

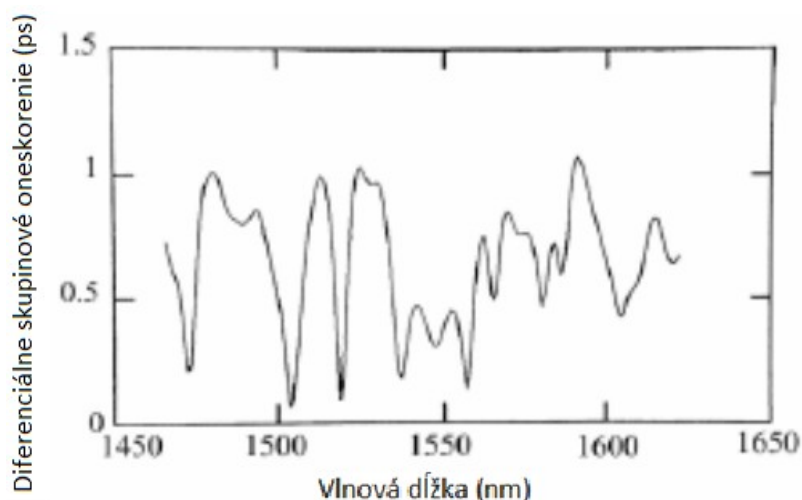
3.5.2 Jonesová maticová metóda

Používa sa laditeľný laserový zdroj, polarizačný analyzátor a polarizačný regulátor. Pre každú vlnovú dĺžku je skenovaná polarizácia regulátora a matematický výpočet sa vykoná pomocou Jonesového maticového formalizmu. Z tejto metódy je odvodené diferenciálne skupinové oneskorenie, ktoré je maximálne oneskorenie, čo môže byť zistené cez polarizáciu v danej vlnovej dĺžke.



Obrázok 3.6: Schéma Jones Matrix metódy pre meranie DGD

Pre vlákno, ktorého dĺžka je kratšia ako dĺžka spojenia je DGD nezávislé na vlnovej dĺžke. Avšak pre dlhé vlákna je DGD závislé na vlnovej dĺžke. Preto na určitom rozsahu vlnových dĺžok je PMD vypočítané ako stredná hodnota DGD. Typická hodnota vlnovej dĺžky môže byť ± 40 nm okolo prevádzkovej vlnovej dĺžky.



Obrázok 3.7: DGD verus vlnová dĺžka (Jonesová maticová Metóda)

Jonesová maticová metóda poskytuje informácie o diferenciálnom skupinovom oneskorení v závislosti na vlnovej dĺžke. Použitím úzkopásmového laditeľného laseru, nie je minimálna merateľná hodnota PMD obmedzená.

3.5.3 Interferometrická metóda

V tejto metóde sa používa polarizovaný širokopásmový zdroj a Michelsonov skenovací interferometer. Interferometer môže byť videný pri analyzéry Fourierovej transformácie spektra.

Ako sa uvádza nižšie, pre krátke vlákna, v interferometrickej obálke, jediný regulačný lúč zodpovedajúci vrcholu autokorelačného zdroja, a dva satelitné vrcholy na každej strane regulačného vrcholu. Nerovnováha na interferometri medzi centrálnym vrcholom a satelitnými vrcholmi znamená PMD. Inferogram môže byť tiež považovaný za Fourierovú transformáciu prenášaného spektra metódy skenovania vlnových dĺžok, branou nad spektrálnym rozsahom zdroja.

Pre dlhšie náhodne módovo-viazané vlákna, sa inferogram blíži Gaussovej funkcii vynásobenej šumom po odobratí autokorelácie.

Z matematického hľadiska, je signál obálky Fourierovej transformácie prenosového spektra vyplývajúci z metódy skenovania vlnových dĺžok. PMD je daná šírkou obálky. V súvislosti s meraním, nie je v autokorelácii obsiahnutá žiadna informácia. Preto môže byť odstránená výpočtom alebo pridaním štvrt'vlnovej dosky do vnútra interferometra na vytvorenie deštruktívnej interferencie, keď majú obe ramená interferometra rovnakú dĺžku. Táto druhá metóda umožňuje vyšší dynamický rozsah, čo má za následok schopnosť testovať spojenia, lepšiu opakovateľnosť a vyššiu presnosť. Táto metóda je vhodná pre požiadavky merania v teréne. Testovacie nástroje sú prenosné, robustné a môžu pracovať na batérii. Interferometrická metóda je necitlivá na pohyby vlákna. Preto poskytuje presné meranie v niekoľkých sekundách a nepotrebuje priemerovanie. Vysoko výkonné širokopásmové zdroje môžu byť použité na zvýšenie dynamického rozsahu, ktorý umožní merať dlhé spojenia až do 250 km. Táto metóda môže byť tiež použitá na meranie PMD cez niekoľko zosilňovačov ako je tomu u EDFAs. Avšak táto metóda je limitovaná minimálnou merateľnou hodnotou PMD, v závislosti na spektrálnej šírke širokopásmového zdroja.

	Fixed Analyzer Method	Jones Matrix Method	Interferometrické metódy	
			TINTY	GINTY
Aplikácia	Akémkoľvek spojenie	Laboratórium	Akémkoľvek spojenie	Akémkoľvek spojenie
Obmedzenia merania	Vysoká citlivosť na pohyb vlákna	Vysoká citlivosť na pohyb vlákna Iba C&L skupiny		
Rozsah merania	Od 0,08 ps do 60 ps	Od 0,03 ps do 50 ps	Od 0,04 ps do 80 ps	Od 0,04 ps do 115 ps
Dynamický rozsah	<50 dB	<50 dB	>60 dB	<50 dB
Rýchlosť merania	Rýchle, avšak potreba priemerovania	Pomalé	Rýchle	Rýchle, avšak potreba priemerovania
Cena	Nízka	Vysoká	Nízka	Nízka

Tabulka.3.1: Porovnanie metód pre meranie PMD

3.6 PMD limity a kompenzácie

PMD je spôsobená napätím vo vlákne počas výroby alebo zmenami podmienok v životnom prostredí a preto je podstatnou súčasťou sietí. Ale nízka úroveň PMD môže byť v sieťach tolerovaná v závislosti na tom aká rýchlosť prenosu je braná do úvahy. Všeobecne je hodnota PMD 10% z periódy bitu.

SDH	SONET	Prenosová rýchlosť	Periódna bitu	PMD limit
	OC-1	51,84 Mbit/s	19,29 ns	2 ns
STM-1	OC-3	155,52 Mbit/s	6,43 ns	160 ps
STM-4	OC-12	622,08 Mbit/s	1,61 ns	160 ps
	OC-24	1244,16 Mbit/s	803,76 ps	80 ps
STM-16	OC-48	2489,32 Mbit/s	401,88 ps	40 ps
STM-64	OC-192	9953,28 Mbit/s	100,47 ps	10 ps
STM256	OC-768	39318,12 Mbit/s	25,12 ps	2,5 ps

Tabulka.3.2: PMD limity v závislosti na prenosovej rýchlosti

PMD je nestabilný jav a preto nie je ľahké ho kompenzovať. Avšak pre tento účel boli vyvinuté Disperzné Kompenzačné Moduly (DCM). Tieto moduly sú umiestnené pred prijímačmi a môžu byť nastavené na nepretržitú kompenzáciu disperzie alebo na vzorku optických pulzov.[1][6]

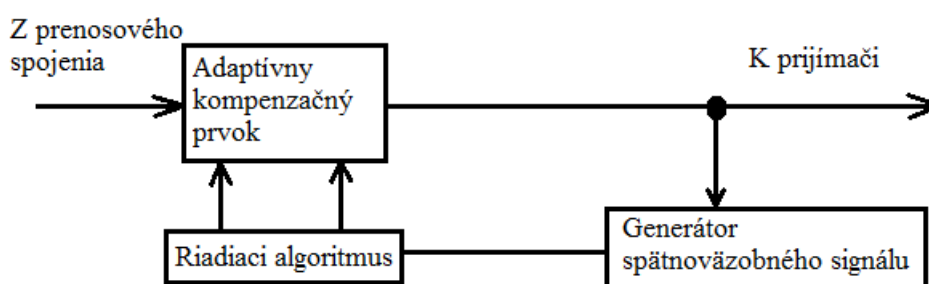
3.6.1 Optické PMD kompenzátory

Optické PMDC boli prvým postupom, ktorý bol navrhnutý a demonštrovaný pre boj s PMD efektmi. Zároveň sú najefektívnejšími technikami na kompenzáciu PMD pre systémy s priamou detekciou optickej komunikácie.

Princíp prevádzky Optického PMDC

Okrem zahájenia PSP, kde je na vysielacom konci použitý regulátor polarizácie (PC) na zladenie SOP signálu s jedným z PSP spojení. Optický PMDC je navrhnutý tak, aby mal PMD vlastnosti opačné k prenosovému spojeniu. V systémoch využívajúcich optické vlákna, môže byť PMD modelované ako zreťazenie mnohých dvojlomových prvkov. V zásade, na prijímacej strane, ak optický PMDC skladajúci sa z počtu dvojlomových prvkov rovnému počtu dvojlomových prvkov v prenosovom spojení, a tie by mohli byť nastavené spôsobom, ktorým by boli prvky PMDC opačné k zodpovedajúcim prvkom v prenosovom spojení, PMD môže byť úplne kompenzovaná. Avšak, nie je len nepraktické aby mal optický PMDC toľko dvojlomových prvkov, ale tiež by bolo ťažké kontrolovať tieto prvky. V reálnom systéme dosiahol optický PMDC až druhého rádu aproximácie s niekoľkým dvojlomovými prvkami.

Obrázok 3.8 znázorňuje štruktúru typického optického PMDC. Pozostáva z adaptívneho kompenzačného prvku, generátoru spätnoväzobného signálu a jednotky s riadiacim algoritmom. Adaptívny kompenzačný prvok zvyčajne zahŕňa niekoľko PC a dvojlomových prvkov. Optický PMDC je dynamicky nastavovaný spätnoväzobným signálom na sledovanie PMD a SOP variácií v reálnom systéme. Široko používané signály pre optické PMDC sú: stupeň polarizácie (DOP), vysokofrekvenčné tóny, RF výkon v určitej šírke pásma a diagram oka. Riadiaci algoritmus v sledovacom režime sleduje zmeny PMD v spojení s optimalizáciou spätnoväzobného signálu. Môže byť použitá metóda pokus-omyl, alebo nejaký postupný vyhľadávací algoritmus.



Obrázok 3.8: Štruktúra optického PMDC

Efekt rôzneho typu modulácie na optický PMDC

Typy modulácie ovplyvňujú optické PMDC troma spôsobmi. Po prvé, majú vplyv na účinnosť optických PMDC. Po druhé, dĺžka dvojlomových prvkov v optickom PMDC závisí na typu modulácie. Po tretie, účinnosť niektorých spätnoväzobných signálov závisí na typu modulácie.

PMD teda závisí na typu použitej modulácie. Kde nie je PMD kompenzovaná, PMD je väčšinou spôsobená PMD prvého rádu, a to spôsobuje väčší postih pri typu modulácie so širším pulzom (užšou šírkou pásma). Tam kde sa PMD kompenzácia nachádza, efekty PMD vyššieho rádu sa stanú dominantnými, a tým signál s väčšou šírkou pásma (menšia šírka pulzu) dostane menšie zlepšenie z PMD kompenzácie.

Účelom optického PMDC je znížiť celkovú PMD, ale môžu nastať podmienky, pri ktorých optický PMDC môže zvýšiť celkovú PMD vyššieho rádu. Napríklad, celková PMD druhého rádu v prenosovom spojení s použitím optického PMDC je

$$\vec{\Omega}'_t = R\vec{\Omega}'_f + \vec{\Omega}'_c + \vec{\Omega}_c * \vec{\Omega}_t \quad (1)$$

kde $\vec{\Omega}_t$ je celkový PMD vektor, $\vec{\Omega}_f$ a $\vec{\Omega}_c$ sú PMD vektory prenosového spojenia a PMDC, a R je rotačná matica PMD kompenzátora. Pokiaľ je braná do úvahy len PMD prvého rádu, optický PMDC s väčším DGD môže kompenzovať väčšiu PMD. Avšak, podľa rovnice 1, optický PMDC s veľkým DGD môže zvýšiť celkovú PMD druhého rádu, ktorá znižuje celkový výkon optického PMDC. Preto existuje optimálna hodnota DGD pre optický PMDC, ktorá má tendenciu byť menšia pre typ modulácie s väčšou šírkou pásma, keďže signál s väčšou šírkou pásma je náchylnejší na účinky PMD vyššieho rádu.

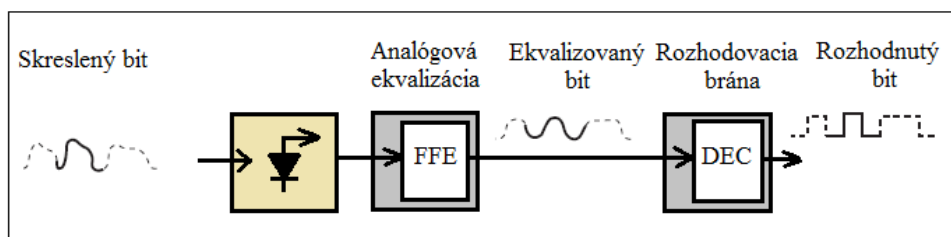
Účinnosť spätnoväzobného signálu a DOP, majú taktiež veľmi závisia na typu modulácie. Len pre NRZ a DPSK, je DOP monotónna s DGD. Pre RZ-OOK a CSRZ, DOP osciluje s DGD. RZ signál má tiež menší rozsah detekcie jednoznačného DGD ako NRZ. Tieto vlastnosti DOP budú mať vplyv na výkon optického PMDC. Preto nemôže byť DOP priamo použitý ako spätnoväzobný signál u PMDC pre všetky typy modulácií. U niektorých typov modulácií, musí byť použitý úzkopásmový filter buď na zníženie oscilácie s DGD, alebo na zvýšenie rozsahu jednoznačného DGD.

3.6.2 Elektronické Ekvalizéry Skreslenia

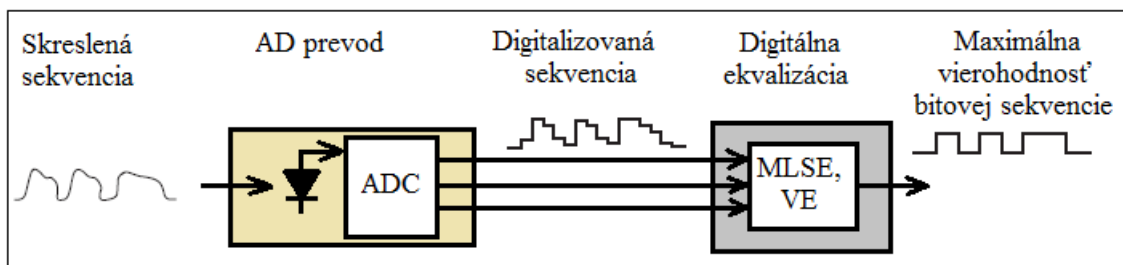
Elektronické ekvalizéry skreslenia (EDE), často označované ako elektronické disperzné kompenzátory (EDC), sú adaptívne elektronické obvody, ktoré vykonávajú spracovanie signálu hneď po optickej detekcii na prijímacej strane a majú za úlohu odstrániť časť skreslenia spôsobeného prenosom. Vďaka ich integrácii ako jednoduchý elektronický čip do dosky optického prijímača, ponúkajú sľubnú a potenciálne nízko rozpočtovú alternatívu alebo komplementárny prístup k nastaviteľným optickým prostriedkom pre zvýšenie dosahu a prenosovej rýchlosti.

Optické metódy ako disperziu kompenzujúce vlákna alebo optické PMD kompenzátory môžu všeobecne prekonať elektrické ekvalizéry. A to v dôsledku straty optickej fázy a polarizačnej informácie po detekcii fotodiodou. Avšak jediný lacný EDE čip implementovaný v každom prijímači, potenciálne umožní pokrok smerom k väčším dosahom a väčším prenosovým rýchlostiam. Okrem toho, že uvoľňuje konštrukčné obmedzenia na optickej infraštruktúre. V určitých prípadoch môže umožniť odstránenie drahých, jemne ladených optických kompenzátorov skreslenia umiestnených na prijímacej strane.

Existujú dva rôzne základné typy elektronických ekvalizérov, a to buď s analógovými alebo digitálnymi spracovacími prostriedkami. Oba typy ekvalizérov možno realizovať ako integrovaný obvod so špecifickými aplikáciami (ASIC) na ploche čipu, niekoľko štvorcových milimetrov, ktorý sa automaticky prispôsobuje akýmkoľvek pomaly sa meniacim skresleniam bez potreby tréningovej sekvencie. Obrázky 3.9 a 3.10 zobrazujú hlavné architektúry prijímača.



Obrázok 3.9: Analógová ekvalizácia (FFE) signálu z fotodiódy nasledovaná rozhodovaním bit po bitu



Obrázok 3.10: Digitálne spracovanie (MLSE, Viterbiho ekvalizér) po A/D prevode signálu z fotodiódy

Analógové ekvalizéry

Sú tri druhy analógových elektronických ekvalizérov. Multiodbočkové dopredné ekvalizéry (FFE), ekvalizéry so spätným rozhodovaním (DFE), a ich kombinácia. DFE obsahuje rozhodovaciu bránu. Tento typ ekvalizéru spracováva niekoľko po sebe idúcich bitov v rovnakom čase, ale dáta budú potom rozhodované bit po bitu.

Pre 43 Gbit/s, FFE využíva distribuované elektrické zosilňovače, ktoré slúžia ako oneskorovacie prvky a nastaviteľné analógové štvor-kvadrantové násobičky.

Analógové štvor-kvadrantové násobičky, musia byť prispôbované automaticky, aby bol možný prenos cez dynamicky skreslené optické vlákna. Sú k dispozícii rôzne techniky pre prispôbovanie analógových elektronických ekvalizérov. V systémoch používajúcich FEC, počet opravených chýb, môže byť použitý ako spätno-väzobný signál pre prispôbovací algoritmus. Počet chýb je použitý v rozloženom algoritme pre adaptáciu FFE a rozhodovacieho obvodu, kde každá odbočka a rozhodovací prah, sú optimalizované nezávisle z dôvodu minimalizácie počtu chýb. Vzhľadom k náhodnému výskytu chybných bitov, musí byť vyhodnotený vysoký počet chýb pre dosiahnutie stabilného spätno-väzobného signálu. Vzhľadom k tomu, že prenosový systém pracuje s krajne najhorším prípadom BER 10^{-5} ... 10^{-4} , aktualizácia spätno-väzobného signálu sa dá očakávať v priebehu niekoľkých milisekúnd, čo znamená, že úplne prispôbovanie nastane v priebehu niekoľko sto milisekúnd.

Alternatívnou metódou je vloženie monitoru otvorenia oka paralelne s rozhodovacím okruhom. Tento monitor diagramu oka vyhodnotí vertikálne otvorenie oka prijatého signálu dát meraním priemernej a efektívnej hodnoty jednotiek a núl. Sú možné dve verzie:

- 1) Sériový monitor otvorenia oka pozostáva z rozhodovacieho okruhu, kde sú prah a vzorkovanie neustále ladené.
- 2) Paralelný monitor otvorenia oka využíva A/D prevodník.

Obidva monitory otvorenia oka majú parameter, ktorý sa vzťahuje k otvoreniu oka alebo k Q-faktoru diagramu oka ekvalizovaného signálu. Tento parameter je potom použitý v rovnakom rozložení algoritmu, ako so spätnou väzbou s počtom chýb. Vzhľadom k tomu, že monitor otvorenia oka pracuje nezávisle na rozhodovacom obvode, umožňuje vyššiu rýchlosť adaptácie než sa dosiahne s použitím FEC.

Digitálne ekvalizéry

Digitálne elektronické ekvalizéry používajú odhad maximálnej vierohodnosti sekvencie (MLSE) implementáciou Viterbiho algoritmu. V porovnaní s analógovými ekvalizérmi, vyžadujú komplexnejšie spracovanie signálu. Po prvé, prevádzajú prijatý dátový signál do digitalizovaných vzoriek použitím A/D prevodníku s 3-4 bitovým rozlíšením. Potom sa vypočíta najpravdepodobnejšia prijatá sekvencia v digitálnom procesore použitím Viterbiho algoritmu: tj., súčasne spracuje a rozhodne sekvenciu dát, čo vedie k potenciálne vyššiemu výkonu v porovnaní s analógovým typom. Prispôbenie analógového ekvalizéru je vykonávané štatistickou analýzou skôr prijatých dátových signálov, ktoré sú k dispozícii v rámci digitálneho ekvalizéra. Rýchlosť prispôbenia je potom porovnateľná ako u analógového ekvalizéra využívajúceho paralelný monitor otvorenia oka.

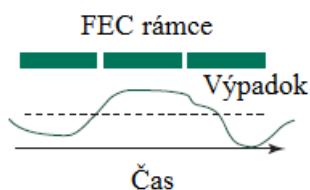
Výkon EDE

Vo vysokorýchlostných systémoch založených na symbolových rýchlostiach nad 10 Gbaud, kde PMD je hlavným zhoršením, aplikácia EDE má za následok zlepšenie výkonu systému. Aj napriek tomu, že optický PMDC môže byť potrebný, EDE môže uvoľniť ich presnosť pre kompenzáciu prenosových zhoršení. Preto pre každý kanál v systémoch s miernou PMD, môže byť kompenzácia optickej disperzie vynechaná, to znamená, že na ladenie nákladné optické kompenzátory môžu byť vynechané. Pre prípad nízkych prijateľných OSNR postihov, napr. pod 1 dB, analógové a digitálne ekvalizéry poskytujú porovnateľné PMD tolerancie. EDE nie sú obmedzené na určité skreslenie, napr. PMD, ale môžu byť tiež použité na kompenzáciu množstva iných skreslení spôsobujúcich ISI, napr. obmedzenie šírky pásma.

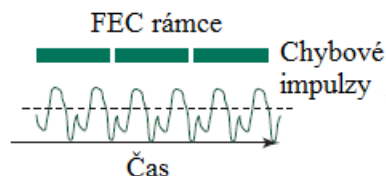
3.6.3 Kompenzácia PMD rýchlo-polarizačným skramblováním

Systém s polarizačnými skramblermi môže v danej situácii fungovať lepšie alebo aj horšie ako v prípade systému bez PS. Napríklad, spojenie s určitým DGD, v danom momente, môže pozostávať z dvoch sekcií, v ktorých sa hodnoty DGD môžu rovnať, byť o niečo väčšie, alebo byť oveľa väčšie ako celková hodnota DGD. Ak je PS vložený medzi tieto dve sekcie, výkon systému v prvých dvoch prípadoch bude lepší, ale v treťom prípade bude horší. Celkový výkon systému závisí na celkovej hodnote DGD a počtu použitých PS.

Obrázky 3.11, 3.12 a 3.13 znázorňujú princípy kompenzácie PMD pomocou skramblovania. Základný princíp týchto systémov, zobrazený na obrázkoch 3.11 a 3.12, je ten, že skramblery urýchľujú PMD štatistiky prenosového vlákna po dobu sub-FEC rámca (napr. 12 μ s pre OTU-2 FEC). Preto sú doby výpadku, indukované PMD, transformované na krátkodobé chybové impulzy, tak ako je zobrazené na obrázku 3.12, a môžu byť teda opravené FEC. Tento postup neodmysliteľne patrí k DWDM, kde sa polarizačné skramblery nachádzajú v optickom spojení a zmiernenie PMD je dosiahnuté u všetkých DWDM kanálov súčasne.

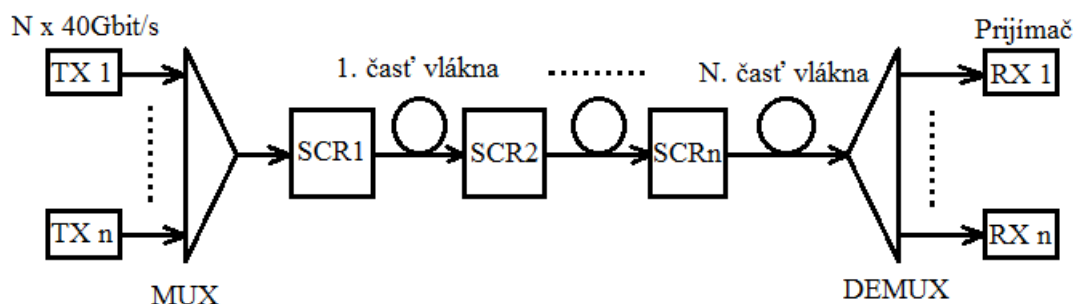


Obrázok 3.11: BER bez skramblovania



Obrázok 3.12: BER so skramblováním FEC rámcov

Obrázok 3.13 zobrazuje typické nastavenie pre rýchle polarizačné skramblovanie pre $N \times 40\text{Gbit/s}$. Rýchle polarizačné skramblery SCR1 až SCRn sú umiestnené pozdĺž celého optického spojenia. Prvý skrambler je pred prvou časťou spojenia a ďalšie skramblery po každej časti spojenia. V zásade každá časť spojenia môže mať rôznu dĺžku, v závislosti na PMD tej danej časti.



Obrázok 3.13: Rýchlo-polarizačné skramblovanie

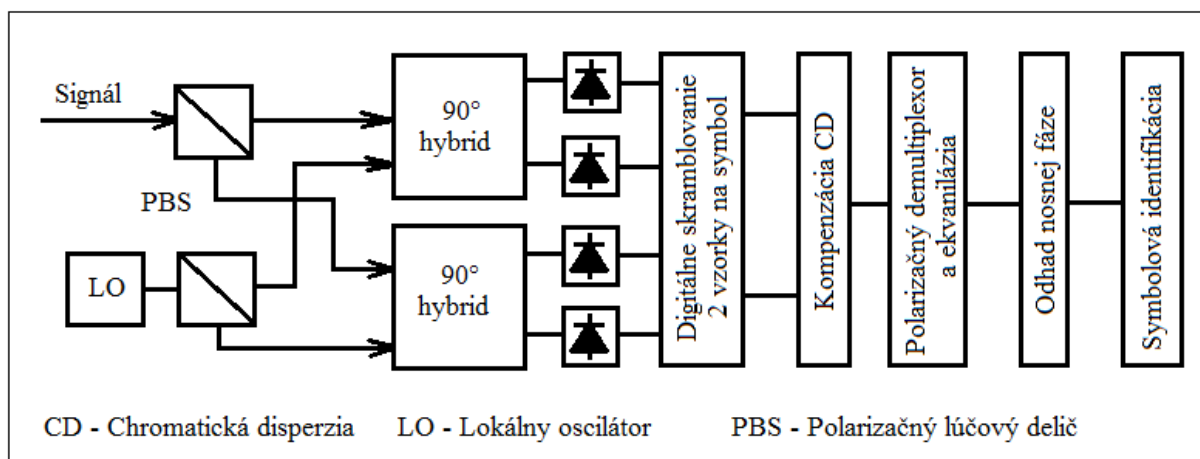
3.6.4 DSP umožňujúce PMDC techniky

S pokrokmí vo vysokorýchlostnom spracovaní digitálneho signálu (DSP) a A/D prevádzacích obvodoch, sa v poslednej dobe objavili výkonné digitálne PMDC techniky. Prvou z nich je digitálna PMDC technika založená na digitálnej koherentnej detekcii. Druhá technika je založená na koherentnom optickom OFDM (CO-OFDM). V ďalšej časti budú stručne opísané obe techniky.

Digitálny PMDC v digitálnom koherentnom prijímači

Vzhľadom k pokroku u vysokorýchlostného elektronického DSP, bol oživený záujem o optickú koherentnú detekciu. Polarizačným delením multiplexovaná QPSK (PDM-QPSK) s koherentnou detekciou, bola navrhnutá ako jedno z riešení, ako aktualizovať existujúce 10 Gbit/s WDM siete s 50 GHz delením kanálov na 40 Gbit/s alebo 100 Gbit/s. Digitálna koherentná detekcia, pri ktorej je dostupná informácia celého optického poľa, má potenciál zvýšiť spektrálnu účinnosť s viacúrovňovou moduláciou a kompenzovať všetky lineárne chyby prenosu ako sú chromatická disperzia a polarizačná módová disperzia v elektrickej oblasti použitím DSP. Obrázok 3.14 je blokový diagram typického intradyne digitálneho koherentného prijímača. Po prechode polarizačným lúčovým deličom (PBS), každá polarizácia prijatého signálu je kombinovaná s lokálnym oscilátorom v 90° hybridoch. Po hybridoch sú detekované štyrmi detektormi štyri prútoky signálu. Tie sú potom vzorkované a digitalizované pre ďalšie spracovanie. DSP sa spravidla skladá zo štyroch krokov:

1. Kompenzácia CD
2. Polarizačná demultiplexácia a kompenzácia
3. Odhad nosnej fázy
4. Symbolová identifikácia



Obrázok 3.14: Schéma digitálnej koherentnej detekcie pre PDM signál

Polarizačná demultiplexácia a kompenzácia sú dosiahnuté v štyroch paralelne bežiacich ekvalizéroch. Za predpokladu, že prenosové funkcie štyroch ekvalizérov sú h_{xx} , h_{xy} , h_{yx} a h_{yy} vstupné a výstupné signály z ekvalizérov môžu byť vyjadrené ako:

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{xx} & h_{xy} \\ h_{yx} & h_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

V princípe, ak Jonesova matica $H = \begin{pmatrix} h_{xx} & h_{xy} \\ h_{yx} & h_{yy} \end{pmatrix}$ je inverzná k Jonesovej matici prenosového spojenia, efekt PMD môže byť úplne kompenzovaný.

Tieto ekvalizéry možno realizovať s frakčne rozloženými ekvalizermi (FSEs). Intuitívne, na kompenzáciu DGD τ , počet odbočiek, ktorý FSEs vyžadujú je:

$$N = \tau M / T_s \quad (3)$$

kde M je počet vzoriek na symbol, a T_s je symbolová perióda. V reálnom systéme, je potrebný na vykonanie polarizačnej demultiplexácie a kompenzácie PMD slepý ekvalizačný algoritmus. Príkladom je algoritmus konštantného modulu. Vzhľadom na existenciu PMD vyššieho rádu a použitie slepej ekvalizácie, je zvyčajne potrebný väčší počet odbočiek, než je uvedené v rovnici 3.

Digitálny PMDC v CO-OFDM

OFDM je široko používaná modulácia/multiplexácia v bezdrôtovej komunikácii, a nedávno bola zavedená aj do komunikácie pomocou optických vlákien. Optická OFDM spolu s digitálnou koherentnou detekciou, potenciálne umožňujú jednoduchú kompenzáciu lineárnych chýb v prenose pomocou optických vlákien ako je PMD. V kombinácii s PDM, boli vo vysokorýchlostnom CO-OFDM prenose preukázané vysoké tolerancie PMD.

V PDM-OFDM, sú dáta najskôr rozdelené do x-ových a y-ových polarizačných vetiev. Každá z nich je mapovaná na mnoho frekvenčných subnosných s určitou moduláciou, ktoré sú spolu s pilotnými subnosnými, prenesené do časovej oblasti inverznou Fourierovou transformáciou. Cyklický prefix sa potom používa na prispôsobenie medzisymbolového rušenia spôsobeného efektmi ako disperzia a PMD. Vzorky v časovej oblasti sú prevedené dvoma D/A prevodníkmi predtým ako vstupujú do dvoch vstupno-fázových/kvadraturných modulátorov. Modulované optické signály sú kombinované pomocou polarizačného lúčového deliča pre PDM. Na zjednodušenie určenia kanálov sú vložené cvičné symboly (TSs) do sekvencie symbolov. V prijímači, je potom použitá digitálna

koherentná detekcia na vzorkovanie polí dvoch ortogonálnych zložiek prijatého optického signálu. Následne je vykonaná symbolová synchronizácia, a TSs sú extrahované pre určenie kanálu. Pri 112 Gbit/s PDM-OFDM signálu sa ukázalo, že tolerancia PMD je väčšia než 100 ps, aj keď boli brané do úvahy účinky PMD vyššieho rádu.

3.6.5 Porovnanie kompenzačných technológií

V tabuľke 3.3 je zobrazený náhľad na tolerancie PMD v závislosti na použitej kompenzačnej technológii. Jedná sa o hodnoty pre prenos 40 Gbit/s.[5]

Kompenzačná technológia	PMD tolerancia
Štandardný prijímač	2,8 ps
Analógový elektronický ekvalizér	4,3 ps
Digitálny MLSE	4,8 ps
Optický PMD kompenzátor	9 ps
Distribúované skramblovanie	5,5 ps
CO-OFDM	100 ps
Koherentný PDM-QPSK	30 ps

Tabuľka.3.3: Porovnanie rôznych PMD kompenzácií

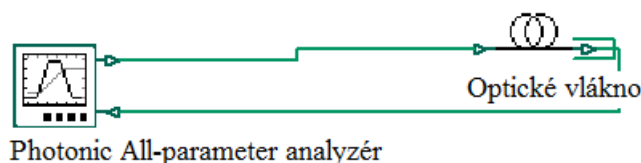
4 Simulácia vplyvu PMD na prenos v PON sieti pomocou programu Optiwave

4.1 Závislosť PMD na dĺžke vlákna

Ako prvá bola vykonaná simulácia závislosti PMD na dĺžku vlákna. K tejto simulácii bol využitý Photonic All-parameter analyzér, ktorého výstupnou veličinou je PMD koeficient. Tento koeficient je možné prepočítať na hodnotu určujúcu DGD_{Mean} pomocou rovnice (4), kde L je dĺžka vlákna a DGD_{Mean} je stredná hodnota DGD v ps. DGD_{Mean} sa potom rovná hodnote PMD, ktorá sa taktiež udáva v ps.[8]

$$PMD_Q = \frac{DGD_{Mean}}{\sqrt{L}} \quad (4)$$

Pre simuláciu bolo ako prenosové médium vybrané optické vlákno. Toto vlákno malo následne nastavené vlastnosti a parametre podľa reálneho vlákna typu G.652D. Simulácia prebehla v program Optiwave podľa schémy uvedenej na obrázku 4.1.



Obrázok 4.1: Schéma zapojenia pre simuláciu závislosti PMD na dĺžke vlákna

Nastavené parametre optického vlákna, dôležité pre simuláciu, sú uvedené v tabuľke 4.1. Všetky hodnoty sú hraničné, predstavujú teda najhorší možný prípad.

Útlm [dB/km]	Disperzia [ps/(nm*km)]	PMD _Q [ps/km ^{1/2}]	Dĺžka vlákna [km]
0,2	18	0,2	1 až 100

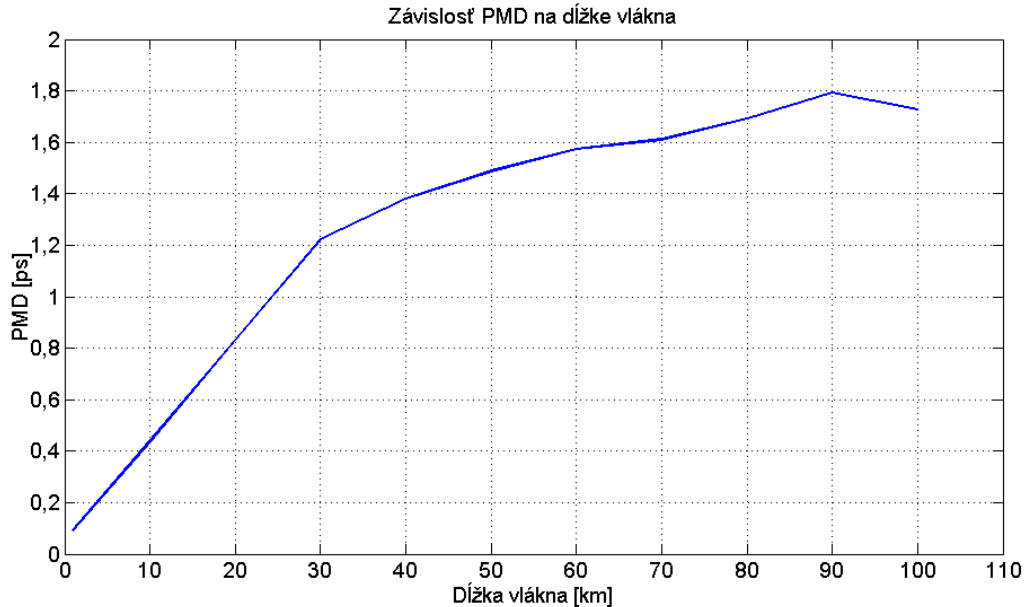
Tabuľka 4.1: Parametre nastavenia vlákna pre simuláciu

V ďalšej tabuľke 4.2 sú uvedené výsledky simulácie. Dĺžka vlákna bola postupne nastavovaná od 1km do 100 km, aby bolo vidieť akým spôsobom PMD rastie v závislosti na dĺžke vlákna.

Dĺžka vlákna [km]	PMD _Q [ps/km ^{1/2}]	PMD [ps]	Dĺžka vlákna [km]	PMD _Q [ps/km ^{1/2}]	PMD [ps]
1	0,091	0,091	60	0,203	1,573
10	0,138	0,437	70	0,192	1,61
20	0,185	0,829	80	0,189	1,692
30	0,223	1,223	90	0,189	1,792
40	0,218	1,38	100	0,1727	1,727
50	0,210	1,488			

Tabuľka 4.2: Nasimulované a vypočítané hodnoty pre PMD jav s koeficientom vo vlákne nastaveným na $PMD_Q=0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$

Údaje z tabuľky boli potom spracované v grafe na obrázku 4.2. Podľa nasimulovaných hodnôt a priebehu zobrazenom v grafe, je vidieť, že pre vlákna do 30 km rastie PMD lineárne. Potom začína byť jej rast menší a zvyšuje sa nelineárne. Pri dĺžke vlákna 100 km dosahuje hodnotu 1,72 ps. Táto hodnota je dostačujúca aj pre prenosovú rýchlosť 40 Gbit/s. Pretože ako je uvedené v predošlej kapitole, tolerancia detektora na PMD pri prenosovej rýchlosti 40 Gbit/s je 2,5 ps.



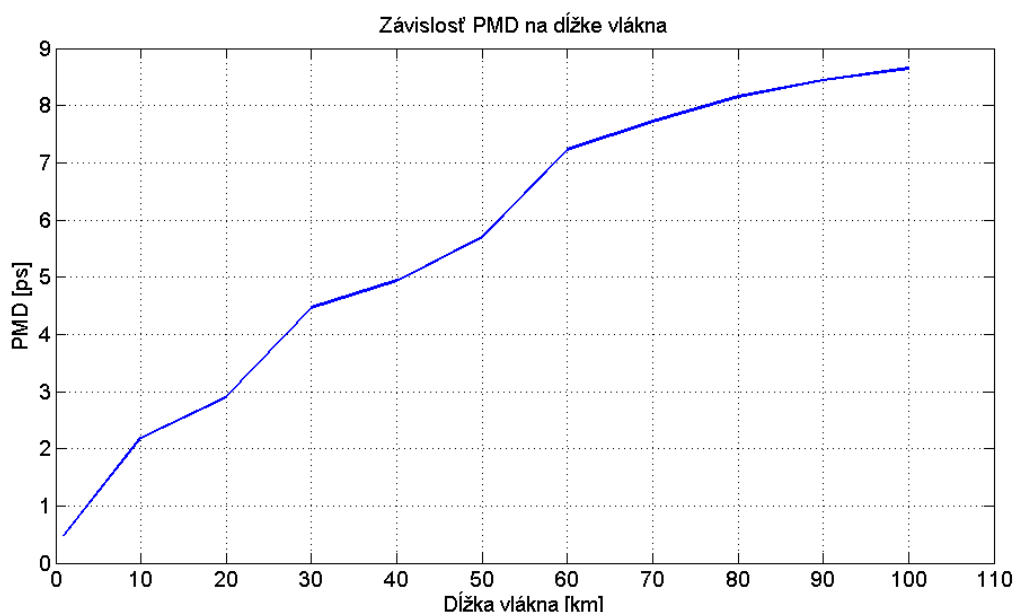
Obrázok 4.2: Graf závislosti PMD na dĺžke vlákna

Nasledujúce dve simulácie budú skúmať závislosť PMD na dĺžke vlákna pri zvýšenej hodnote PMD koeficientu vo vlákne. Budú to hodnoty $0,9 \text{ ps/km}^{1/2}$ a $5 \text{ ps/km}^{1/2}$. Pri použití rovnice (4), by mali pri sto kilometrovom vlákne vyjsť približne hodnoty 9 ps a 50 ps. Ostatné parametre vlákna ostanú nastavené rovnako ako pri prvej simulácii. V tabuľke 4.3 sú uvedené nastavené dĺžky vlákna, nasimulované hodnoty PMD koeficientu a vypočítané hodnoty DGD_{Mean} , teda PMD v ps.

Dĺžka vlákna [km]	$\text{PMD}_0 [\text{ps/km}^{1/2}]$	PMD [ps]	Dĺžka vlákna [km]	$\text{PMD}_0 [\text{ps/km}^{1/2}]$	PMD [ps]
1	0,481	0,481	60	0,933131	7,228
10	0,692855	2,191	70	0,923075	7,723
20	0,650696	2,91	80	0,911869	8,156
30	0,815924	4,469	90	0,889443	8,438
40	0,780608	4,937	100	0,865	8,65
50	0,806102	5,7			

Tabuľka 4.3: Nasimulované a vypočítané hodnoty pre PMD jav s koeficientom vo vlákne nastaveným na $\text{PMD}_0 = 0,9 \text{ ps/km}^{1/2}$

Na obrázku 4.3 je následne zobrazený priebeh PMD javu podľa toho, ako bola dĺžka vlákna postupne zvyšovaná od 1 km do 100 km. Z grafu je vidieť, že PMD stúpalo do dĺžky vlákna 60 km lineárne, ak neberieme do úvahy menšie výkyvy. Od dĺžky vlákna 60 kilometrov sa rast PMD zmenšil.



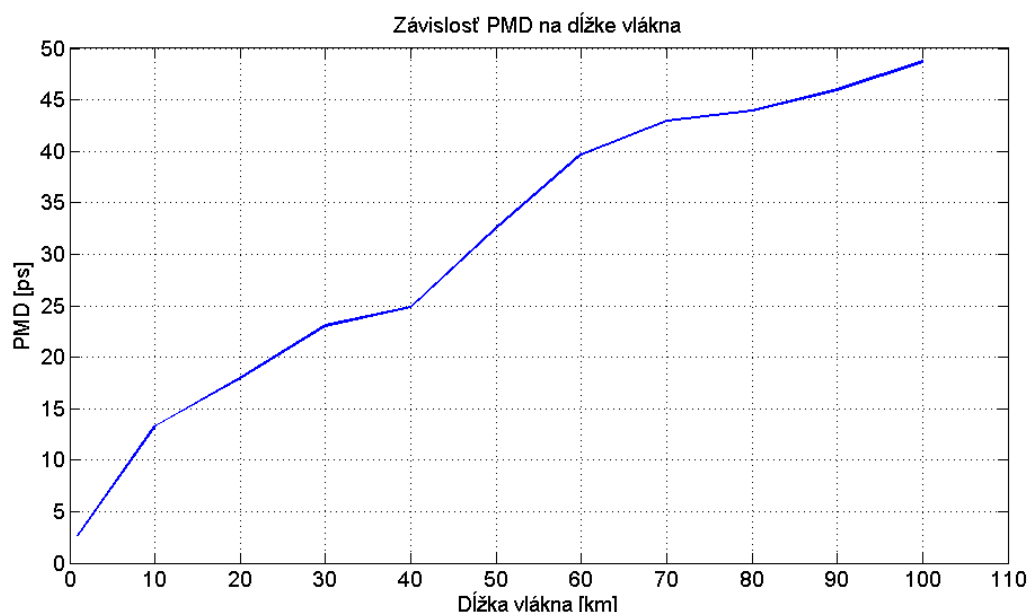
Obrázok 4.3: Graf závislosti PMD na dĺžke vlákna

Poslednou časťou tejto podkapitoly bola simulácia s PMD koeficientom vo vlákne nastaveným na $5 \text{ ps/km}^{1/2}$. Jedná sa o vysoký obsah PMD vo vlákne, ktorý by pri vysokých rýchlostiach spôsobil značné problémy pri detekovaní signálu. Výsledky simulácie sú uvedené v tabuľke 4.4.

Dĺžka vlákna [km]	$\text{PMD}_Q [\text{ps/km}^{1/2}]$	PMD [ps]	Dĺžka vlákna [km]	$\text{PMD}_Q [\text{ps/km}^{1/2}]$	PMD [ps]
1	2,643	2,643	60	5,129121	39,73
10	4,212154	13,32	70	5,134702	42,96
20	4,018214	17,97	80	4,913759	43,95
30	4,207787	23,047	90	4,845663	45,97
40	3,92913	24,85	100	4,8723	48,723
50	4,603265	32,55			

Tabuľka 4.4: Nasimulované a vypočítané hodnoty pre PMD jav s koeficientom vo vlákne nastaveným na $\text{PMD}_Q = 5 \text{ ps/km}^{1/2}$

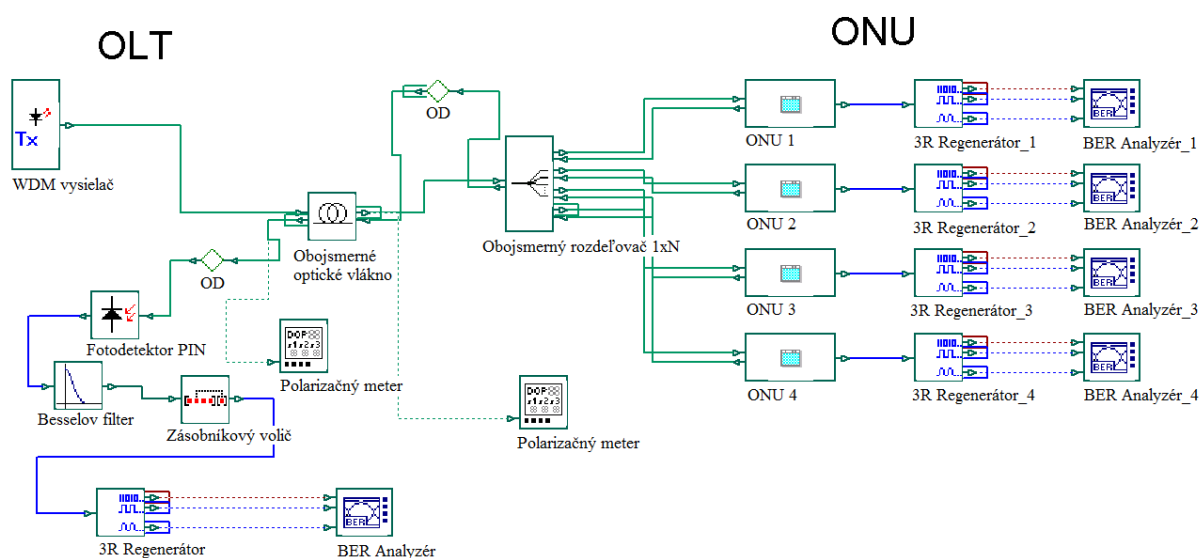
Priebeh PMD javu vo vlákne je zobrazený v grafe na obrázku 4.4. Hodnota PMD pri dĺžke vlákna 100 kilometrov vyšla 48,7 ps, teda približne rovnako ako keby sa použila hodnota $5 \text{ ps/km}^{1/2}$, ktorá bola nastavená vo vlákne, v rovnici (4) uvedenej na začiatku kapitoly. Z grafu je vidieť, že PMD rástla najmä v prvých 60 kilometroch vlákna. V tomto úseku narástla o 40 ps, zatiaľ čo vo zvyšných 40 kilometroch narástla už len približne o 9 ps. To potvrdzuje predošlé simulácie, v ktorých taktiež PMD rástla najmä v prvých 60 kilometroch.



Obrázok 4.4: Graf závislosti PMD na dĺžke vlákna

4.2 Simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom DOP

Pre tento bod zadania bolo v programe Optiwave zostavené zapojenie, ktoré je uvedené na obrázku 4.5. Zapojenie sa skladá z dvoch hlavných častí PON siete a to z OLT a ONU. PON je prístupová sieť, ktorá využíva na rozdelenie signálu medzi užívateľov pasívne splitre. OLT je zariadenie slúžiace ako koncový bod PON siete u poskytovateľa. ONU je naopak koncový bod PON siete na strane užívateľa. Jednotlivé komponenty zapojenia sú popísané nižšie. Pre prenos bolo použité obojsmerné vlákno s parametrami ako pri predošlej simulácii.



Obrázok 4.5: Schéma zapojenia pre simuláciu vplyvu PMD na prenos v programe Optiwave

Každá jednotka ONU sa skladajú z nasledujúcich komponentov:

- WDM vysielateľ
- Besselov filter
- Fotodektor PIN
- 3 R Regenerátor
- BER Analyzér

Popis a význam jednotlivých komponentov obsiahnutých v zapojení pre simuláciu vplyvu PMD na prenos v PON sieti:

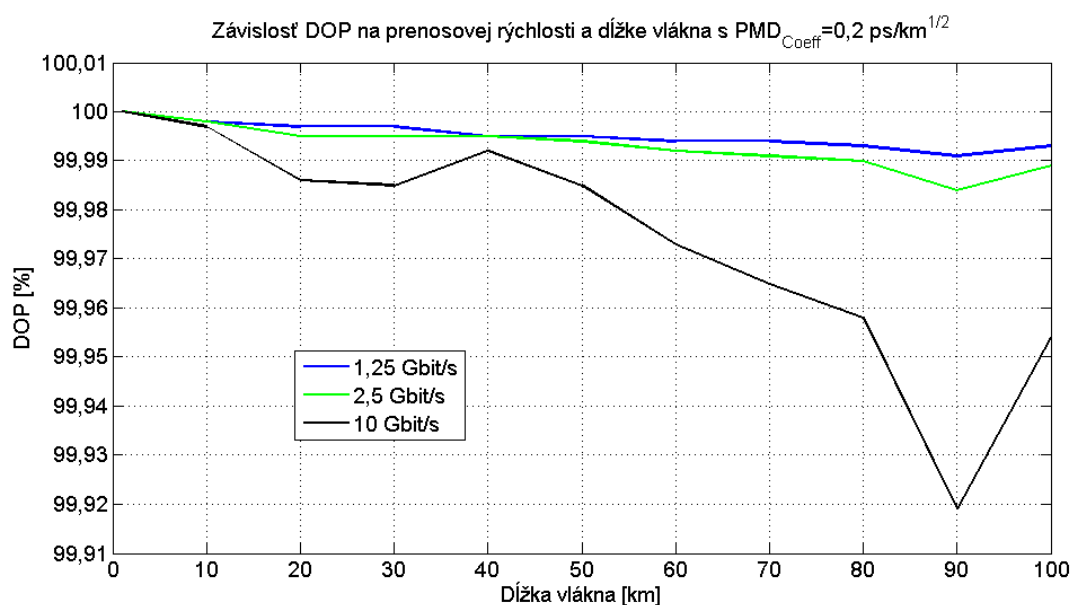
- **WDM vysielateľ** - zdroj optického signálu s nastaveným výkonom 1 mW, frekvenčným delením 100 GHz, NRZ kódovaním a pracovnou vlnovou dĺžkou 1550 nm pre WDM vysielateľ umiestený v OLT a 1310 nm pre WDM vysielateľ použité v jednotkách ONU.
- **Fotodetektor PIN** - Optický prijímač, ktorý ideálnym obdĺžnikovým filtrom filtruje vstupný optický signál a šum. Týmto filtrom sa zníži počet vzorkov v elektrickom signále. Nová vzorkovacia frekvencia je potom definovaná parametrom *Sample rate*. Citlivosť elektrického výkonu na optický vstup bola nastavená na 1 A/W a temný prúd na 10 nA.
- **Besselov filter** - typ lineárneho filtra s maximálnou plochou skupinového oneskorenia
- **Zásobníkový volič** - umožňuje zvoliť jeden zo signálov na vstupe voliča
- **3R Regenerátor** - tento komponent regeneruje elektrický signál. Generuje originálnu bitovú sekvenciu, a modulovaný elektrický signál použiteľný pre BER analýzu.
- **BER analyzér** - tento vizualizér umožňuje automaticky vypočítať a zobrazíť chybovosť BER elektrického signálu. Dokáže taktiež odvodiť rôzne metriky z diagramu oka, ako napríklad otvorenie oka, zatvorenie oka alebo Q-faktor.
- **Polarizačný meter** - tento komponent umožňuje vypočítať priemerný polarizačný stav optického signálu, vrátane Stupňa polarizácie (DOP) alebo Stokesových parametrov.
- **Obojsmerný rozdeľovač 1xN** - tento komponent delí optický signál na vstupe do N výstupov.
- **Obojsmerné optické vlákno** - komponent simulujúci obojsmerné jednomódové optické vlákno

Prvou časťou tejto podkapitoly je simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom stupňa polarizácie (DOP) pri hodnote PMD koeficientu nastavenou na $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$. Simulácia bola urobená pre prenosové rýchlosti 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s. Dĺžka vlákna bola postupne nastavená od 1 km až po 100 km. Stupeň polarizácie je hodnota udávaná v percentách a určuje na koľko percent je svetlo polarizované. Hodnota 100 % znamená, že svetlo je úplne polarizované a hodnota 0% znamená, že svetlo je nepolarizované. Všetky hodnoty medzi 0 % a 100 % znamenajú eliptickú polarizáciu. Táto eliptická polarizácia vytvára medzi dvoma vlastnými polarizačnými stavmi, ktoré sa šíria jednomódovým optickým vláknom fázový posun. Dôsledkom tohto fázového posunu je vznik diferenciálneho skupinového oneskorenia, ktoré popisuje PMD jav. Jednotlivé výsledky simulácie sú uvedené v tabuľke 4.5.

Prenosová rýchlosť	1,25 Gbit/s	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
Dĺžka vlákna [km]	DOP [%]	DOP [%]	DOP [%]
1	100	100	100
10	99,998	99,998	99,997
20	99,997	99,995	99,986
30	99,997	99,995	99,985
40	99,995	99,995	99,992
50	99,995	99,994	99,985
60	99,994	99,992	99,973
70	99,994	99,991	99,965
80	99,993	99,99	99,958
90	99,991	99,984	99,919
100	99,993	99,989	99,954

Tabuľka 4.5: Stupeň polarizácie v závislosti na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

Z tabuľky 4.5 je vidieť, že stupeň polarizácie sa pri PMD koeficiente $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$ mení len minimálne. Pre prenosové rýchlosti 1,25 Gbit/s a 2,5 Gbit/s je to rozdiel tisícín percenta. Pri prenosovej rýchlosti 10 Gbit/s je rozdiel badateľnejší, ale stále sa jedná len o stotiny percenta. Výsledky sú pre lepšiu prehľadnosť a porovnanie vyobrazené pomocou grafu na obrázku 4.6.



Obrázok 4.6: Závislosť DOP na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

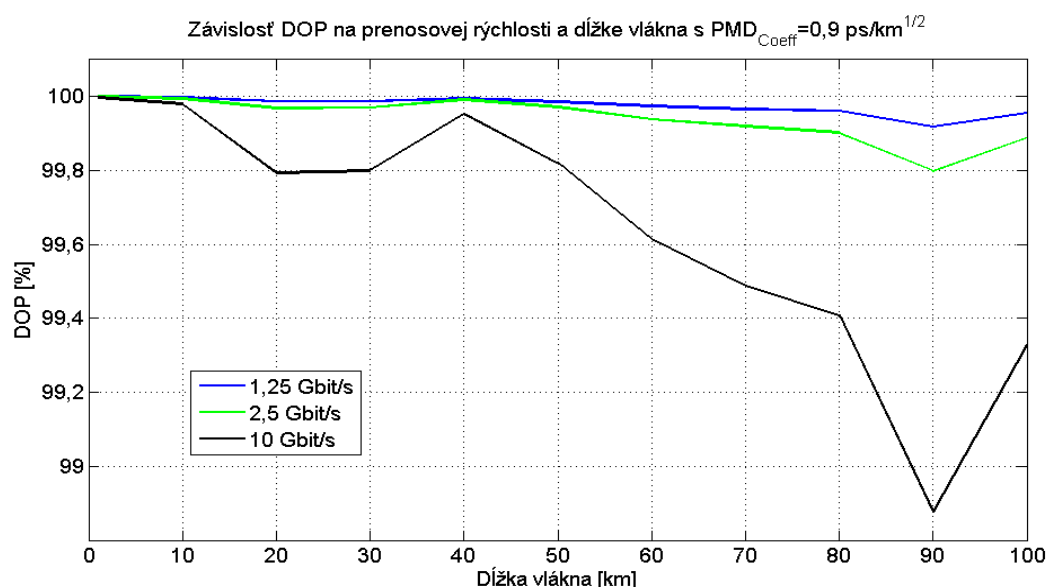
Druhou časťou je simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom DOP s nastavenou hodnotou PMD koeficientu na $0,9 \text{ ps/km}^{1/2}$. Táto hodnota bola zvolená, pretože staršie vlákna môžu dosahovať až takúto hodnotu PMD koeficientu. V minulosti boli takéto parametre dostačujúce, ale v súčasnosti, keď sa prenosová rýchlosť neustále zvyšuje a nároky na kvalitu spojenia sú čoraz väčšie, už takáto hodnota môže znamenať problém pre prenos cez optické vlákno.

Simulácia prebehla opäť na zapojení, ktoré je uvedené na obrázku 4.5. Výsledky sú uvedené v tabuľke 4.6. Simulovalo sa pri rýchlostiach 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s na vlákne s nastavenou dĺžkou od 1 do 100 km. Presné vzdialenosti sú taktiež uvedené v tabuľke 4.6.

Prenosová rýchlosť	1,25 Gbit/s	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
Dĺžka vlákna [km]	DOP [%]	DOP [%]	DOP [%]
1	100	100	99,997
10	99,998	99,995	99,98
20	99,988	99,969	99,794
30	99,988	99,97	99,8
40	99,995	99,992	99,953
50	99,986	99,971	99,82
60	99,974	99,938	99,615
70	99,966	99,92	99,49
80	99,961	99,902	99,409
90	99,919	99,8	98,877
100	99,956	99,889	99,328

Tabuľka 4.6: Stupeň polarizácie v závislosti na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

Pre lepšie porovnanie vplyvu PMD na prenos, sú hodnoty z tabuľky 4.6 vynesené do grafu na obrázku 4.7. Tu je opäť vidieť ako málo sa PMD prejavuje pri prenosových rýchlostiach 1,25 Gbit/s a 2,5 Gbit/s. Pri týchto rýchlostiach klesol stupeň polarizácie len o dve desatiny percenta a aj to až pri dĺžke vlákna 90 kilometrov. Najnižšia hodnota stupňa polarizácie bola dosiahnutá pri simulácii prenosu s nastavenou prenosovou rýchlosťou na 10 Gbit/s. V tomto prípade klesol stupeň polarizácie o jedno percento, čo je oproti predošlým dvom rýchlostiam značný rozdiel.



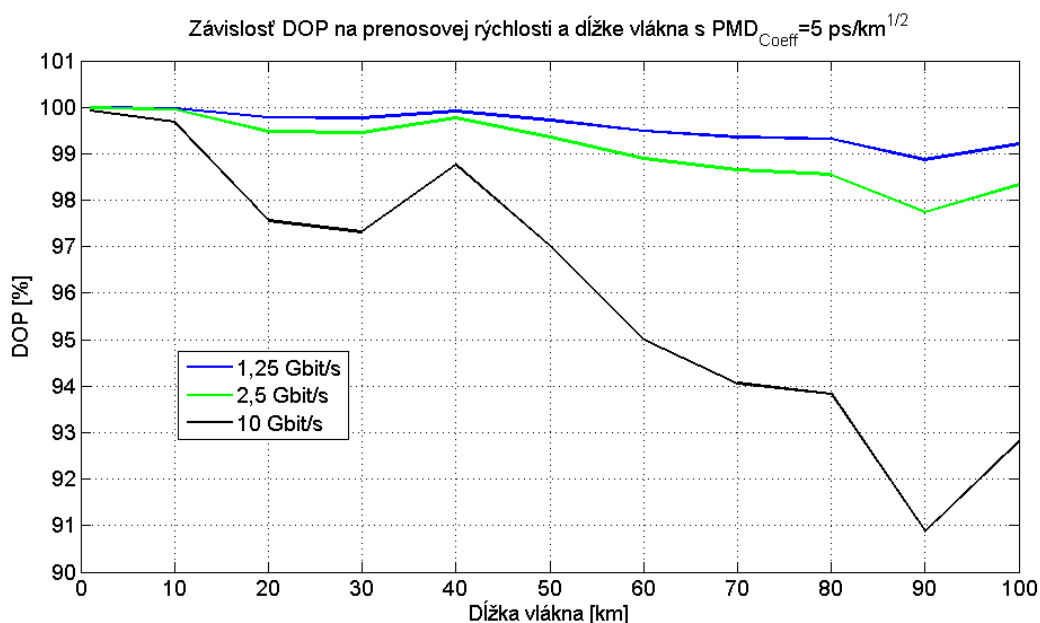
Obrázok 4.7: Závislosť DOP na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

V poslednej časti tejto podkapitoly bola pre simuláciu vplyvu PMD na prenos, zvýšená hodnota PMD koeficientu na $5 \text{ ps/km}^{1/2}$. Toto nastavenie už predstavuje veľmi vysokú hodnotu PMD vo vlákne. Pre sto kilometrové optické vlákno dosahuje PMD 50 ps, ak na prepočet použijeme rovnicu (4) uvedenú v kapitole 4.1. Pre túto simuláciu boli opäť použité rýchlosti 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s. Vlákno bolo nastavené na vzdialenosti uvedené v tabuľke 4.7, v ktorej sú taktiež uvedené aj výsledky simulácie.

Prenosová rýchlosť	1,25 Gbit/s	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
Dĺžka vlákna [km]	DOP [%]	DOP [%]	DOP [%]
1	99,997	99,99	99,922
10	99,98	99,949	99,68
20	99,783	99,476	97,558
30	99,773	99,453	97,321
40	99,916	99,771	98,753
50	99,715	99,352	97,016
60	99,486	98,89	95,005
70	99,358	98,649	94,061
80	99,323	98,555	93,827
90	98,866	97,742	90,875
100	99,212	98,336	92,816

Tabuľka 4.7: Stupeň polarizácie v závislosti na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

Už z tabuľky je vidieť, že nastavením PMD koeficientu na hodnotu $5 \text{ ps/km}^{1/2}$ sa polarizácia výrazne znížila, teda sa vplyv PMD na prenos zvýšil.



Obrázok 4.8: Závislosť DOP na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

Opäť je vidieť, že PMD vplyva na prenos najmä pri vyšších rýchlostiach ako je napríklad 10 Gbit/s. Na grafe, ktorý je na obrázku 4.6, vidieť, že pri dĺžke vlákna 90 km, je stupeň polarizácie dokonca len 90 %. Ak to porovnáme z predošlými hodnotami pri nižších PMD koeficientoch a rovnakej rýchlosti 10 Gbit/s, je to pokles takmer o 10 %. Popisu ako veľmi zníženie stupňa polarizácie vplyva na fázový posun bude venovaná ďalšia kapitola.

4.3 Simulácia vplyvu PMD na prenos prostredníctvom Q-faktoru

Ďalšou simuláciou práce je simulácia, ktorá zobrazuje vplyv PMD na prenos prostredníctvom Q-faktoru. Q-faktor je pomer strednej hodnoty šírky pásma k celkovej šírke pásma. V optike sa šírka pásma rovná šírke spektrálnej čiary. [9]

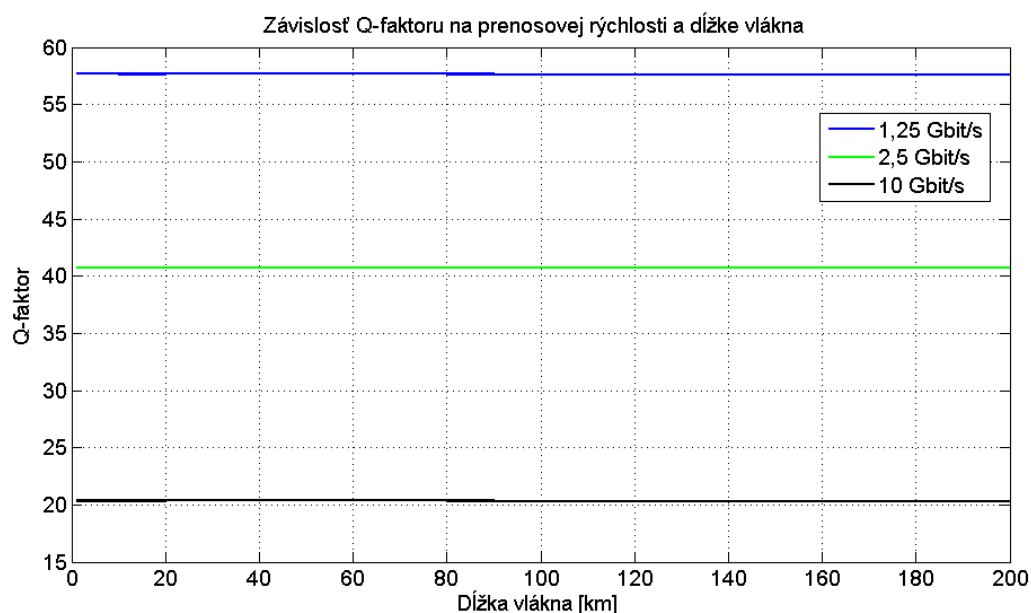
Pre túto simuláciu bolo taktiež použité zapojenie uvedené na obrázku 4.5 v kapitole 4.2. Výsledné hodnoty Q-faktorov boli získané pomocou BER analyzárov umiestnených za každou jednotkou ONU. Pre celú túto simuláciu boli vo vlákne nastavené hodnoty útlmu a disperzie na 0, aby bol vidieť vplyv PMD pri rôznych prenosových rýchlostiach a rôznych dĺžkach vlákna. Hodnota PMD koeficientu bola nastavená podľa reálneho vlákna G.625D na hodnotu $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$. Prenosové rýchlosti boli zvolené tak ako pri predošlých simuláciách 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s. Nasimulované hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.8.

Z hodnoty Q-faktoru sa dá odvodiť hodnota chybovosti BER. Pre telekomunikácie je doporučená maximálna hodnota BER 1×10^{-9} . Aby bola zabezpečená táto hodnota, musí byť hodnota Q-faktoru najmenej 6.

Prenosová rýchlosť	1,25 Gbit/s	2,5 Gbit/s	10 Gbit/s
Dĺžka vlákna [km]	Q-faktor	Q-faktor	Q-faktor
1	57,65	40,75	20,35
10	57,65	40,74	20,34
20	57,64	40,74	20,33
40	57,64	40,74	20,33
60	57,64	40,74	20,33
80	57,64	40,74	20,33
100	57,63	40,74	20,32
150	57,62	40,72	20,29
200	57,62	40,72	20,29

Tabuľka 4.8: Závislosť Q-faktoru na prenosovej rýchlosti a dĺžke vlákna

Z tabuľky 4.8 je vidieť, že Q-faktor sa len veľmi nepatrne mení so zmenou dĺžky vlákna. Avšak všimnime si, že pri zvýšení prenosovej rýchlosti, Q-faktor rapidne klesá. Ak zoberieme do úvahy, že najmenšia doporučená hodnota Q-faktoru je 6, tak nasimulované hodnoty vysoko prevyšujú minimálnu hodnotu. Treba však brať do úvahy, že pri simulácii bol nastavený nulový útlm a disperzia, okrem PMD koeficientu, ktorý mal hodnotu $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$. Pre porovnanie vplyvu PMD na Q-faktor je na obrázku 4.9 uvedený graf.



Obrázok 4.9: Porovnanie hodnôt Q-faktoru pri zmene prenosovej rýchlosti a dĺžky vlákna

5 Záver

Posledným bodom práce je vyhodnotenie výsledkov. Práca obsahuje množstvo výsledkov, tabuliek a grafov, ktoré dokazujú aký veľký vplyv má PMD na prenos. Výsledkom prvých simulácií bola závislosť PMD na dĺžku vlákna. So zvyšujúcou sa dĺžkou vlákna sa zvyšovala aj PMD. Pre vlákna do 30 kilometrov sa zvyšovala takmer lineárne a veľmi prudko. Potom sa zvyšovanie spomalilo a bolo nelineárne. Simulácia prebehla pri troch PMD koeficientoch nastavených vo vlákne a pri všetkých troch bol rast veľmi podobný. Podľa výsledkov a maximálnej hodnoty PMD, pri ktorej detektor dokáže bezchybne rozpoznať impulzy, bolo určené, že pre vlákno s PMD koeficientom $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$ je maximálna prenosová rýchlosť 40 Gbit/s. Pre PMD koeficient $0,9 \text{ ps/km}^{1/2}$ je to rýchlosť 10 Gbit/s a pre $5 \text{ ps/km}^{1/2}$ je to rýchlosť 1,25 Gbit/s. Pre PON je rýchlosť 40 Gbit/s zatiaľ nevyužiteľná, preto bola táto práca zameraná na rýchlosti 1,25 Gbit/s, 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s. Nasledovala simulácia vplyvu PMD prostredníctvom hodnoty stupňa polarizácie DOP. Čím menšia táto hodnota bola tým menej bolo svetlo vo vlákne polarizované a vznikala eliptická polarizácia svetla. Tá spôsobuje fázový posun dvoch vlastných polarizačných stavov v jednomódovom vlákne a tento posun je vyjadrený ako diferenciálne skupinové oneskorenie. Stupeň polarizácie sa pri rýchlostiach do 2,5 Gbit/s takmer nemenil a to aj napriek tomu, že bol PMD koeficient vo vlákne zvýšený až na $5 \text{ ps/km}^{1/2}$. Naopak pri rýchlosti 10 Gbit/s sa začal stupeň polarizácie prudko zvyšovať s narastajúcou dĺžkou vlákna. Pri PMD koeficientoch $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$ a $0,9 \text{ ps/km}^{1/2}$ nebolo zníženie až také viditeľné, ale pri PMD koeficiente $5 \text{ ps/km}^{1/2}$ už bolo toto zníženie markantné a dosahovalo takmer 10%. Poslednou simuláciou bolo simulovanie vplyvu PMD na prenos prostredníctvom Q-faktoru. Z výsledkov je dobre vidieť, že so zvýšením prenosovej rýchlosti sa vplyv PMD výrazne zvyšuje. Ďalším pokračovaním práce by mohol byť výskum vplyvu PMD prostredníctvom polarizačných stavov signálu, alebo fázový posun medzi dvoma vlastnými stavmi v jednomódovom optickom vlákne. Táto práca by mohla byť tiež alternatívou a porovnaním k bakalárskej práci Martina Chrenšča, ktorý skúmal vplyv PMD na prenos pomocou reálnych meraní.

Použitá literatura

- [1] CHAUVEL, Gildas. ANRITSU CORPORATION. *Dispersion in Optical Fibers* [online]. ©2008 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.ausoptic.com/Alltopic/Download/Disp_in_Opt_Fibers_PMD_CD.pdf
- [2] Fiber Dispersion and Optical Dispersion – An Overview. In: *Fiber Optics For Sale* [online]. [21 June 2009] [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/fiber-dispersion-and-optical-dispersion-an-overview>
- [3] *Fiber-Optics.info* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.fiber-optics.info/fiber_optic_glossary/polarization_mode_dispersion
- [4] OFS Knowledge Base: Optical Fiber Resources. *OFS, a Furukawa Company* [online]. © 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.ofsoptics.com/resources/UFOFPM.pdf>
- [5] BÜLOW, Henning, Chongjin XIE, Axel KLEKAMP, Xiang LIU a Bernd FRANZ. PMD Compensation/mitigation techniques for high-speed optical transport. *Bell Labs Technical Journal* [online]. 2009, roč. 14, č. 1, s. 105-124 [cit. 2013-03-30]. ISSN 10897089. DOI: 10.1002/bltj.20357. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/bltj.20357>
- [6] SHARMA, R. L., Ranjit SINGH a Vinod KUMAR. Polarization Mode Dispersion (PMD), its limits, compensation and effect on optical fiber networks. *Journal of computing*. 2011, roč. 2011, č. 8. ISSN 2151-9617. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/64328412/Polarization-Mode-Dispersion-PMD-its-limits-compensation-and-effect-on-optical-fiber-networks>
- [7] JDSU. *Testing Polarization Mode Dispersion in the Field* [online]. 2006 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.jdsu.com/ProductLiterature/pmd_wp_fop_tm_ae.pdf
- [8] WDM Network Design. *Ciscopress.com* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=11>
- [9] *RP Photonics Encyclopedia* [online]. 2013-04-07 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/q_factor.html